



TUGAS AKHIR - TF 141581

**PEMODELAN DAN ANALISA BOILER
MENGUNAKAN KESETIMBANGAN MASSA
DAN ENERGI**

**IKA SANTIATMA
NRP. 2414106 017**

**Dosen Pembimbing
Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D
Nur Laila Hamidah S.T, MSc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017**



FINAL PROJECT - TF141581

***MODELLING AND ANALYSIS OF BOILER
USING ENERGY AND MASS BALANCE***

IKA SANTIATMA
NRP. 2414 106 017

Advisor Lecturer
Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D
Nur Laila Hamidah, S.T, M.Si

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
SepuluhNopember Institute of Technology
Surabaya

2017

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

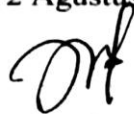
Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ika Santiatma
NRP : 2414106017
Departemen : Teknik Fisika-ITS

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul **“PEMODELAN DAN ANALISA BOILER MENGGUNAKAN KESETIMBANGAN MASSA DAN ENERGI”** adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat sebenar-benarnya.

Surabaya, 2 Agustus 2017



Ika Santiatma

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
PEMODELAN DAN ANALISA BOILER MENGGUNAKAN
KESETIMBANGAN MASSA DAN ENERGI

TUGAS AKHIR

Oleh:
IKA SANTIATMA
NRP. 2414 106 017

Surabaya, Agustus 2017

Menyetujui,

Dosen Pembimbing 1



Gunawan Nugroho, Ph.D
NIPN. 19771127 200212 1 002

Dosen Pembimbing 2



Nur Laila Hamidah, ST, M.Sc
NIPN. 19880110 201504 2 001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D
NIPN. 19780902 200312 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN DAN ANALISA BOILER MENGGUNAKAN KESETIMBANGAN MASSA DAN ENERGI

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

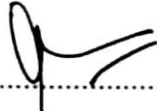


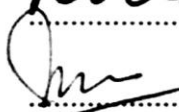

Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

IKA SANTIATMA

NRP. 2414 106 017

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

- | | | |
|--------------------------------------|---|--------------------|
| 1. Gunawan Nugroho, S.T,M.T,
Ph.D |  |Pembimbing I |
| 2. Nur Laila Hamidah, S.T, M.Sc |  |Pembimbing II |
| 3. Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T |  |Ketua Penguji |
| 4. Ir. Harsono, M.T, Ph.D |  |Penguji I |
| 5. Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc |  |Penguji II |

SURABAYA
AGUSTUS, 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

PEMODELAN DAN ANALISA BOILER MENGUNAKAN KESETIMBANGAN MASSA DAN ENERGI

Nama Mahasiswa : Ika Santiatma
NRP : 2414 106 017
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D
Nur Laila Hamidah, S.T, M.Sc

Abstrak

PT. Petrokimia Gresik merupakan salah satu perusahaan yang bergerak dibidang indsutri chemical. Boiler pabrik III pada unit UBB PT. Petrokimia Gresik berfungsi sebagai produksi steam untuk turbin dan plant II. Boiler beroperasi pada tahun 2010, pada bulan Juli 2016 mengalami penurunan efisiensi. Tujuan penelitian ini adalah untuk memodelkan boiler pada PT. Petrokimia Gresik dan menganalisis performansi boiler. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berdasarkan kesetimbangan massa dan energi yang mengacu pada kondisi existing pada boiler, tahap ini untuk menentukan panas yang diserap oleh tiap komponen boiler. Setelah itu, dilakukan perhitungan efisiensi menggunakan metode *Indirect/heat loss* untuk mengetahui *losses* yang terjadi berdasarkan ASME PTC 4-1. Berdasarkan data perhitungan dari pemodelan matematis dengan metode kesetimbangan massa dan energi diperoleh efisiensi rata-rata tiap komponen dalam waktu satu bulan yaitu sebesar 72,44% sedangkan untuk metode *Indirect* dengan nilai 76,45%. Hasil perhitungan efisiensi ini mengalami penurunan dari kondisi komisioning yaitu 85,51%. Adanya pengaruh pengotoran baik yang timbul dari bahan bakar maupun air umpan sangat berpengaruh terhadap efisiensi boiler, ini dapat dilihat dari indikator naiknya gas buang dari 5,07% menjadi 7,4% yang diakibatkan oleh kurangnya permukaan perpindahan panas pada tiap komponen dimana panas yang diserap oleh tiap komponen semakin menurun, panas yang diserap paling tinggi yaitu pada furnace (Q_1) dan paling rendah pada lower air preheater (Q_8)

Kata kunci : Boiler, efisiensi, metode *Indirect*, kesetimbangan massa dan energi

Halaman ini sengaja dikosongkan

MODELLING AND ANALYSIS OF BOILER USING ENERGY AND MASS BALANCE

Name : Ika Santiatma
NRP : 2414 105 045
Departement : Physics Engineering FTI-ITS
Supervisor : Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D
Nur Laila Hamidah, S.T, M.Sc

Abstract

PT. Petrokimia Gresik is one of the companies engaged in industrial chemical. Boiler factory III on unit UBB PT. Petrokimia Gresik serves as steam production for turbine and plant II. Boiler operates in 2010, in July 2016 has decreased efficiency. The purpose of this research is to model boiler at PT. Petrokimia Gresik and analyzing boiler performance. The method used in this research is based on mass and energy balance which refers to the existing conditions in the boiler, this stage to determine the heat absorbed by each component of the boiler. After that, the calculation of efficiency using the method Indirect / heat loss to know losses that occur based on ASME PTC 4-1. Based on calculation data from mathematical modeling using method mass and energy balance obtained average efficiency of each component within one month that is equal to 72,44% while for Indirect method with value 76,45%. The results of this efficiency calculation decreased from the commissioning condition that is 85.51%. The existence of the effect of fouling both arising from fuel and feed water greatly affect the boiler efficiency, this can be seen from the indicator of the exhaust gas rise from 5.07% to 7.4% caused by the lack of heat transfer surface in each component where the heat is absorbed by each component decreases, the highest absorbed heat is on the furnace (Q1) and the lowest lower air preheater (Q8).

Keywords: Boiler, efficiency, heat loss

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis kepada Allah SWT, Karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungan mereka, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

PEMODELAN DAN ANALISA BOILER MENGGUNAKAN KESETIMBANGAN MASSA DAN ENERGI

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan bagi setiap mahasiswa untuk menyelesaikan pendidikannya dan memperoleh gelar Sarjana Teknik, Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menyelesaikan tugas akhir ini penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T, M.Si, Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2. Bapak Hendra Cordova, S.T. M.T selaku Dosen Wali dan yang telah memberikan arahan selama menjalani masa perkuliahan hingga menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D, selaku dosen pembimbing pertama tugas akhir ini, yang selalu memberikan semangat, nasehat dan juga motivasi.
4. Ibu Nur Laila Hamidah, S.T, M.Sc selaku Dosen Pembimbing kedua Tugas Akhir yang senantiasa bersabar,

membantu dalam pembimbingan tugas akhir ini sampai selesai, memberikan semangat dan motivasi.

5. Bapak Oscar Ridwan S.T selaku pembimbing di perusahaan PT. Petrokimia Gresik, yang telah memberikan ilmu, dan bantuan untuk mendapatkan data yang dibutuhkan untuk menyusun tugas akhir ini.
6. Bapak Lutfi, bapak Sis dan bapak Mus, Mas Fardan dan karyawan PT.Petrokimia yang membantu dalam pengambilan data lapangan.
7. Kedua orang tua tercinta, terima kasih atas segala dukungan dan kepercayaan baik moril, spiritual, dan material. Semoga selalu dilimpahkan rahmat dan hidayah-Nya.
8. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Fisika beserta karyawan atas ilmu dan dedikasinya.
9. Teman-teman seperjuangan Program Studi S1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS Surabaya tahun 2014 yang saling memberikan motivasi untuk terus berjuang hingga akhir.
10. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini tentunya masih banyak kekurangan baik menyangkut isi maupun bahasa yang digunakan sehingga tidak menutup kemungkinan bagi penulis untuk menerima kritik maupun saran yang membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Besar harapan penulis semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, 2 Agustus 2017

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PLAGIASI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi

BAB I PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	2
1.3	Tujuan	2
1.4	Batasan Masalah	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1	Boiler.....	5
2.2	Tipe-tipe Boiler	6
2.3	Klasifikasi Boiler B0201B pada PT. Petrokimia	10
2.4	Komponen-komponen utama Boiler	11
2.5	Prinsip Kerja Boiler.....	13
2.6	Keseimbangan massa dan energi	14
2.7	Efisiensi Boiler.....	15
2.7.1	Metode Langsung (<i>Direct Method</i>)	16
2.7.2	Metode tidak langsung.....	17

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Alur penelitian.....	21
3.2	Identifikasi Boiler	22
3.3	Pemodelan Matematis	26
3.3.1	Furnace.....	26
3.3.2	Superheater 2.....	27
3.3.3	Superheater 3.....	28
3.3.4	Superheater 1.....	28

3.3.5 Upper Economizer.....	29
3.3.6 Upper Air Preheater.....	30
3.3.7 Lower Economizer.....	30
3.3.8 Low Air Preheater	31
3.3.9 Feedwater Pump.....	31
3.3.10 Low Air Preheater.....	32
3.4 Perhitungan Metode <i>Indirect</i>	33

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa tiap-tiap komponen	35
4.4.1 Pemodelan Matematis.....	35
4.2 Analisa kehilangan panas dan Diagram Sankey.....	42
4.2.1 Data Perhitungan	43
4.3 Analisa Efisiensi.....	53

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	55
----------------------	----

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A

LAMPIRAN B

LAMPIRAN C

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Fire Tube Boiler</i>	7
Gambar 2.2	Water Tube Boiler	8
Gambar 2.3	Boiler B0201B	11
Gambar 2.4	Ilustrasi Keseimbangan Energi	15
Gambar 2.5	Heat Loss pada Boiler.....	19
Gambar 2.6	Diagram Sankey	20
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	21
Gambar 3.2	Proses Boiler	24
Gambar 3.3	Sistem Pada Furnace	26
Gambar 3.4	Sistem Pada Superheater 1	27
Gambar 3.5	Sistem Pada Superheater 3.....	28
Gambar 3.6	Sistem Pada Superheater 2.....	28
Gambar 3.7	Sistem Pada Upper Economizer.....	29
Gambar 3.8	Sistem Pada Upper Air Preheater.....	30
Gambar 3.9	Sistem Pada Lower Economizer	30
Gambar 3.10	Sistem Pada Low Air Preheater	31
Gambar 3.11	Sistem Pada Feedwater Pump.....	31
Gambar 3.12	Sistem Pada Steam Drum.....	32
Gambar 4.1	Furnace	35
Gambar 4.2	Superheater 2	36
Gambar 4.3	Superheater 3	36
Gambar 4.4	Superheater 1	37
Gambar 4.5	Upper Economizer	37
Gambar 4.6	Upper Air Preheater	38
Gambar 4.7	Lower Economizer.....	38
Gambar 4.8	Lower Air Preheater.....	39
Gambar 4.9	Feedwater Pump	39
Gambar 4.10	Steam Drum	39
Gambar 4.11	Grafik Q pada Superheater.....	40
Gambar 4.12	Grafik Q pada Economizer	40
Gambar 4.13	Grafik Q pada Air Preheater	41
Gambar 4.14	Efisiensi Rata-rata.....	41
Gambar 4.15	Diagram Sankey.....	50

Halaman ini seengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Coal Fired Boiler.....	33
Tabel 4.1	Data Coal Fired Boiler PT.Petrokimia Gresik	43
Tabel 4.2	Data <i>Fuel Analysis</i>	44
Tabel 4.3	<i>Summary of Heat Balance Coal Fired</i>	49
Tabel 4.4	Nilai Efisiensi.....	51

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Petrokimia Gresik merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang industri chemical yaitu memproduksi pupuk, dimana menggunakan bahan bakar batu bara pada proses produksi di boiler. Boiler adalah suatu bejana tertutup yang berfungsi mengubah air menjadi uap yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar baik dalam bentuk padat, cair dan gas. Diketahui boiler pada plan III efisiensinya kurang optimal (yaitu kapasitas terpasang sebesar 85,51% dan sekarang menurun sebesar 8,666 %. Efisiensi dan optimasi kinerja boiler menjadi sangat penting untuk dikaji. Untuk mengetahui ketidakefisien boiler ini maka perlu mengetahui variable input-output dari proses Boiler dengan penurunan model matematis dengan menggunakan hukum kesetimbangan massa dan energi. Boiler yang bekerja dengan efisien akan menghemat bahan bakar.

Penelitian sebelumnya yaitu memodelkan Waste Heat Boiler (WHB) dengan menggunakan kesetimbangan panas dan massa, didapatkan efisiensi WHB sebesar 87.01% pada simulasi dengan menggunakan matlab sedangkan pada real plant didapat efisiensi lebih besar yaitu 98.6% tetapi suhu yang dihasilkan melebihi set point^[12] Namun pada penelitian ini, tidak dihitung mengenai heat loss atau metode indirect. Heat loss adalah menghitung besarnya persentase panas yang tidak bermanfaat, heat mempengaruhi kinerja boiler sehingga dapat dilakukan potensi penghematan energi.

Penelitian sebelumnya yaitu menganalisis unjuk kerja boiler (Gas Firing) pada PLTU Unit 3 PT.PJB UP Gresik menggunakan Metode Kehilangan Panas dimana membandingkan kinerja saat komisioning dan kondisi sekarang.^[13] Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan unjuk kerja Boiler PLTU Unit 3 PT.PJB mengalami penurunan efisiensi sebesar 2,9479% dimana pada saat komisioning efisiensi boiler sebesar 87,0311% sedangkan pada kondisi sekarang sebesar 84,0832%. Kehilangan

panas terbesar diakibatkan karena gas buang kering namun tidak secara per komponen.

Selanjutnya penelitian dengan menganalisa pembentukan slagging dan fouling pembakaran batubara pada Boiler B 0201B Pabrik III Unit UBB di PT. Petrokimia Gresik menyatakan penelitian yang sudah dilakukan didapatkan nilai index dari *slagging* dan index *fouling* sebesar 0,19 dan 0,66. Dari hasil tersebut *index slagging* dan *index fouling* masuk dalam kategori sedang sehingga efisiensi boiler B 0201B didapatkan rata-rata sebesar 57,294%.^[15] Efisiensi pada boiler akan sangat dipengaruhi oleh terbentuknya *slagging* dan juga *fouling*, dengan tingginya *slagging* dan *fouling* yang terjadi atau terbentuk pada dinding serta permukaan boiler akan mempengaruhi perpindahan panas yang terjadi sehingga akan berpengaruh juga terhadap jumlah bahan bakar batubara yang digunakan namun penelitian ini tidak memperhitungkan heat loss.

Sehingga pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan matematis dengan metode kesetimbangan panas dan massa untuk mengetahui efisiensi dan heat loss pada boiler jenis Circulated Fluidized Bed Boiler PT Petrokimia Gresik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan Boiler PT. Petrokimia Gresik dengan metode kesetimbangan massa dan energi.
2. Menganalisis performansi Boiler.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini, antara lain:

1. Memodelkan boiler pada PT. Petrokimia Gresik dengan metode kesetimbangan massa dan energi.
2. Menganalisis efisiensi boiler dengan menggunakan metode *Indirect/Heat Loss*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah :

- Boiler yang akan dianalisa adalah boiler B 0201B Pabrik 3 Unit UBB PT. Petrokimia Gresik.
- Memodelkan boiler dengan menggunakan metode kesetimbangan massa dan energi tiap komponen.
- Penelitian ini berfokus pada hasil efisiensi pembakaran pada *boiler* B 0201B Pabrik 3 Unit UBB PT. Petrokimia Gresik dengan menggunakan metode tidak langsung/ *heat loss*.
- Bahan bakar boiler yaitu batu bara.
- Jenis batubara yang digunakan Kideco Coal dengan nilai GCV 4100 kCal/kg .

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Boiler

Boiler adalah suatu bejana tertutup yang mampu mengubah air menjadi *steam* dengan bantuan panas dari proses pembakaran bahan bakar yaitu batubara. Boiler secara efisien dapat mengubah air menjadi *steam* yang sangat panas dalam volume yang besar. *Steam* tersebut akan digunakan untuk menggerakkan turbin yang dikopel dengan generator. Generator adalah alat untuk membangkitkan listrik. Energi thermal yang dihasilkan kemudian dipindahkan ke fluida kerja yaitu air/feedwater untuk memproduksi uap yang digunakan untuk berbagai keperluan. Selain banyak digunakan pada unit pembangkitan termal khususnya PLTU, boiler juga digunakan pada pabrik-pabrik gula dan kelapa sawit sebagai penyedia uap untuk berbagai proses, seperti penggerak turbin uap untuk keperluan operasional, *cleaning*, automasi minyak, pemanasan/pengeringan bahan baku, penguapan.

Sistem kerja boiler terdiri dari sistem air umpan/air pengisi boiler, sistem uap, sistem bahan bakar serta sistem udara pembakaran dan gas buang.^[3] Sistem air umpan menyediakan air untuk boiler secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Sistem uap berfungsi untuk mengumpulkan dan mengontrol produksi uap dalam boiler. Sistem bahan bakar merupakan semua peralatan yang digunakan dalam menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan energi panas yang dibutuhkan, seperti coal handling system pada berbahan batu bakar, oil handling system pada berbahan minyak, dan natural gas system pada boiler berbahan bakar natural gas. Sistem udara pembakaran dan gas buang merupakan semua peralatan yang digunakan dalam menyediakan udara sebagai suplai untuk pembakaran serta membuang dan mengontrol gas hasil pembakaran ke atmosfer.

2.2 Tipe-tipe Boiler

Tipe-tipe boiler dapat dibedakan menurut tujuan dan konstruksinya, daerah yang mengalami pemanasan, sumber panasnya, sirkulasi airnya, dinding penyangganya. ^[3]

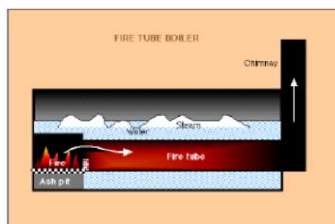
Berdasarkan pada tujuan dan konstruksinya boiler dibedakan menjadi enam yaitu:

1. ***Package Boiler*** yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:
 - Penggunaan : proses industri
 - Bahan bakar : minyak dan gas
 - Kapasitas uap : 220 ton/jam
 - Desain tekanan : 110 Bar
 - Desain temperatur : 500°C
 - Perakitan dilakukan dalam pabrik
2. ***Industrial Boiler*** yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:
 - Penggunaan : proses industri, menggerakkan turbin
 - Bahan bakar : minyak, gas dan batu bara
 - Kapasitas uap : 200 ton/jam
 - Desain tekanan : 120 Bar
 - Desain temperatur : 500°C
 - Perakitan dilakukan dimana boiler akan digunakan
3. ***Utility Boiler*** yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:
 - Penggunaan : keperluan pembangkitan listrik
 - Bahan bakar : batu bara, minyak dan gas
 - Kapasitas uap : 1850 ton/jam
 - Desain tekanan : 173 Bar
 - Desain temperatur : 538°C
 - Perakitan dilakukan dimana boiler akan digunakan
4. ***Circulating Fluidized Bed Boiler*** yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:
 - Penggunaan : proses industri, menggerakkan turbin
 - Bahan bakar : padat
 - Emisi : ramah lingkungan
 - Kapasitas uap : 800 ton/jam

- Desain tekanan : 120 Bar
 - Desain temperatur : 500°C
 - Perakitan dilakukan dimana boiler akan digunakan
5. **Supercritical Boiler** yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:
- Penggunaan : keperluan listrik
 - Bahan bakar : pulverized coal
 - Kapasitas uap : 2500 ton/jam
 - Desain tekanan : 253 Bar
 - Desain temperatur : 538°C
 - Efisiensi tinggi, tanpa menggunakan steam drum
 - Perakitan dilakukan dimana boiler akan digunakan
6. **Marine Boiler** yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:
- Penggunaan : penggerak turbin dalam kapal
 - Bahan bakar : padat, minyak dan gas
 - Kapasitas uap : 70 ton/jam
 - Desain tekanan : 58 Bar
 - Desain temperatur : 500°C
 - Ruang tempat yang digunakan terbatas (minimum)

Berdasarkan daerah yang mengalami pemanasan, boiler dibedakan menjadi dua yaitu :

1. **Fire Tube Boiler**



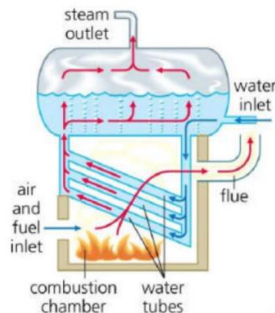
Gambar 2.1 *Fire Tube Boiler*^[3]

Pada fire tube boiler, gas panas hasil pembakaran mengalir melalui pipa-pipa yang dibagian luarnya yang diselimuti air sehingga terjadi perpindahan panas dari gas

panas ke air dan air berubah menjadi uap. Fire tube boiler biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relatif kecil dengan tekanan steam rendah sampai sedang. Fire tube boiler kompetitif untuk kapasitas steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm² (UNEP, 2008). Boiler jenis ini banyak digunakan di pabrik-pabrik gula karena tidak memerlukan tekanan uap yang tinggi. Fire tube boiler dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas tau bahan bakar padat dalam operasinya.

2. *Water Tube Boiler*

Pada boiler jenis ini, air berada di dalam pipa sedangkan gas panas berada di luar pipa. Ketel pipa air dapat beroperasi dengan tekanan sangat tinggi (lebih dari 100 Bar). Ketel uap pipa air dapat bekerja optimal pula serta sirkulasi air dan uap di dalam ketel juga berlangsung dengan baik. Boiler yang biasa digunakan pada instalasi pembangkitan tenaga listrik adalah jenis *water tube*.



Gambar 2.2 *Water Tube Boiler*^[3]

Berdasarkan sumber panasnya boiler/furnace dibedakan menjadi dua yaitu:

1. *Conventional Boiler*

Pada boiler konvensional sumber energi panas didapatkan dari hasil pembakaran bahan bakar, baik bahan bakar padat, cair maupun gas.

Jenis-jenis boiler konvensional yang umum digunakan pada pembangkit listrik antara lain:

- Stocked Fired Boiler
Boiler jenis stocker, pembakaran bahan bakarnya (batu bara) ditempatkan diatas rantai tank yang bergerak di sepanjang tungku sehingga batu bara terbakar.
- PC (Pulverize Combustion) Boiler
Boiler jenis pembakaran bahan bakarnya menggunakan bahan bakar batu bara yang telah dihaluskan terlebih dahulu dengan menggunakan mesin mill/pulverized, kemudian serbuk batu bara (pulverized coal) disemprotkan ke ruang bakar sehingga mengapung dan terbakar ditengah-tengah ruang bakar.
- Circulating Fluidized Bed Boiler
Dalam *system* sirkulasi, parameter *bed* dijaga untuk membentuk padatan melayang dari *bed*. Padatan diangkat pada fase yang relatif terlarut dalam pengangkat padatan. Tidak terdapat pipa pembangkit *steam* yang terletak dalam *bed*.

2. ***Heat Recovery Steam Generator***

HRSG atau juga disebut boiler limbah panas/waste heat boiler, memanfaatkan panas sisa dari proses lain. Seperti halnya, HRSG pada instalasi PLTGU yang memanfaatkan energi panas dari gas buang turbin gas (dengan temperatur diatas 500°C) untuk menguapkan feedwater yang mengalir pada pipa-pipa HRSG. Uap yang dihasilkan digunakan untuk memutar turbin yang satu poros dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik yang diparalelkan dengan jaringan interkoneksi.

Berdasarkan dinding penyangganya boiler dibedakan menjadi dua yaitu:

1. ***Bottom Supported*** yaitu boiler yang menggunakan sandaran dinding dibawah atau terletak di tanah.
2. ***Top Supported*** yaitu boiler yang menggunakan sandaran dinding atap atau menggantung.

Berdasarkan sirkulasi airnya, boiler dibedakan menjadi dua yaitu:

1. ***Sirkulasi Alami***

Boiler tipe ini sirkulasi alami merupakan boiler yang sirkulasi aliran airnya terjadi secara alamiah tanpa menggunakan pompa sirkulasi, yaitu dengan memanfaatkan perbedaan densitas antara sisi downcomer dengan sisi waterwalltube.

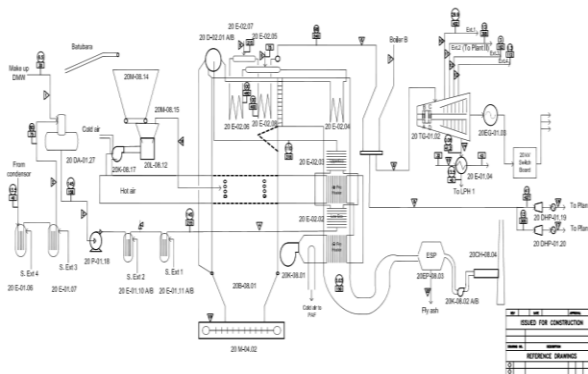
2. ***Sirkulasi Paksa***

Pada boiler tipe sirkulasi paksa, sebuah pompa digunakan untuk mengatur flowrate dan perbedaan tekanan saat sirkulasi.

2.3 **Klasifikasi Boiler B0201B pada PT. Petrokimia Gresik**

3.

PT. Petrokimia Gresik mulai beroperasi pada tanggal 24 Agustus 1976, setelah diresmikan oleh Presiden Soeharto. Memiliki 3 pabrik dan banyak unit. Pada penelitian tugas akhir ini memilih pabrik 3 Unit UBB membahas mengenai *Boiler B 0201B*. UBB mulai beroperasi pada tahun 2010. Instrument yang akan dibahas adalah *boiler B 0201B* pada unit utilitas batubara ini merupakan salah satu ketel uap dengan jenis *Water Tube Boiler* yang digunakan untuk menyuplai kebutuhan uap panas sebagai pembangkit energi dan juga suplai steam untuk pabrik II dan pabrik III, dimana dalam hal ini yang berperan sebagai pembangkit ialah *Turbin Generator*. Kondisi operasional dari *boiler* ini memiliki kapasitas produksi maksimum uap panas sebesar 150 ton/jam^[5]



Gambar 2.3 Boiler B 0201B ^[5]

2.4 Komponen-komponen utama Boiler

Berikut ini merupakan komponen-komponen utama yang ada pada *Boiler 520 B 401* yaitu

a. Burner

Burner berfungsi mencampur bahan bakar dengan perbandingan tertentu, sehingga reaksi pembakaran dapat berjalan dengan baik dan bahan bakar yang terbakar dapat menghasilkan energi panas yang maksimal.^[16]

b. Drum Boiler

Drum boiler berfungsi untuk menampung air yang akan diubah menjadi uap dengan menggunakan panas dari hasil reaksi pembakaran di dalam ruang pembakaran. Terdapat dua jenis *drumdi boiler* yaitu :

- *Steam Drum*

Steam drum merupakan tempat menampung *steam* sekaligus memisahkan antara uap dan air. Di dalam *steam drum* ini terdapat *cyclone separator* berfungsi untuk memisahkan uap dari pengotor air umpan ketel dan *steam dryer* untuk mengeringkan *steam* hasil produksi.

- *Mud Drum*

Mud drum berfungsi untuk mengumpulkan air panas yang akan didistribusikan ke dalam *wall tube*. Terdapat pipa yang berfungsi untuk pembuangan berkala.

- c. *Water Tube*

Water tube merupakan pipa-pipa yang dilewati air di dalam *boiler* digunakan sebagai tempat pemanasan air.

- d. *Furnace*

Furnace adalah ruang tempat pembakaran. Dinding, atap, dan lantai ruang pembakaran terdiri dari *tube-tube (wall tube)*.

- e. *Combustion Chamber*

Combustion chamber berfungsi untuk tempat pembakaran *fuel oil* dan memindahkan panas ke dalam air yang berada di sekelilingnya. Berbentuk silinder dan bergelombang letaknya horizontal.

- f. *Superheater Tube*

Superheater tube berfungsi untuk memanaskan uap jenuh (*saturated steam*) menjadi uap lanjut (*superheated steam*).

- g. *Forced Draft Fan (FDF)*

Forced Draft Fan adalah alat pendorong udara untuk pembakaran pada ketel uap yang melalui lorong udara (*duct*) sebelum bercampur dengan bahan bakar.

- h. *Man Hole (Lubang Laluan)*

Man hole berfungsi sebagai tempat aktifitas pekerja saat melakukan perawatan dan perbaikan. Letak *man hole* berada di atas dan bagian belakang *drum boiler*. Setelah perawatan maka *man hole* akan ditutup kembali agar tidak ada kebocoran saat *boiler* beroperasi.

- i. *Stack (Cerobong)*

Stack berfungsi untuk membuang gas sisa pembakaran ke atmosfer setelah melewati *gas duct*.

2.5. Prinsip Kerja Boiler

Proses pembentukan uap pada *boiler* diawali dengan mengalirkan air umpan *boiler* (*Boiler Feed Water*) dari tangki penampungan air umpan ke *deaerator* menggunakan pompa *deaerator* dengan tekanan yang sesuai spesifikasi yang dibutuhkan.^[16] Pada unit *deaerator* air umpan akan mengalami proses deaerasi, yaitu proses penghilangan kandungan gas-gas terlarut yang tidak dikehendaki / tidak boleh terikut ke dalam *boiler* terutama kandungan gas oksigen dan karbondioksida yang dapat menyebabkan *foaming* dan korosif, dengan sistem mengalirkan air melewati *tray-tray* pada unit *deaerator* yang kemudian dari arah samping dilakukan penyemprotan menggunakan media uap panas bertekanan rendah (*Low Pressure Steam*) sehingga akan terjadi proses pemisahan air dan gas-gas terlarut. Air yang telah terbebas dari kandungan oksigen akan ditampung dalam vesel penampung / akumulator, sedangkan oksigen dan gas-gas terikut lainnya akan dibuang ke atmosfer melalui *venting*.

Pada outlet *deaerator* juga dilakukan injeksi cairan kimia yaitu: *Hydrazine* yang berfungsi untuk menghilangkan kandungan oksigen yang masih terikut, *Amine* yang berfungsi sebagai pelapis / film untuk mencegah korosif, dan *Phosphate* yang berfungsi mengontrol pH air. Selanjutnya air umpan akan dipompakan ke *boiler* menggunakan pompa *Boiler Feed Water* dengan tekanan yang sesuai spesifikasi pada *boiler* ke dalam *steam drum*. Kemudian dengan sirkulasi alami, air umpan akan turun menuju *mud drum* melalui *tube-tube down comer*.

Adanya radiasi panas dari proses pembakaran bahan bakar pada ruang bakar (*combustion chamber*), akan menyebabkan air umpan mengalami kenaikan temperatur hingga terjadi perubahan fasa, yang mengakibatkan air mengalami penurunan *density* dan akan mengalir ke atas melalui *tube-tube riser* menuju *steam drum*. Selanjutnya air yang telah berubah menjadi uap basah (*wet steam*), akan dialirkan menuju unit *superheater* untuk mendapatkan pemanasan lanjut agar terjadi kenaikan

temperatur pada tekanan tetap, sehingga akan menghasilkan *superheated steam*. Unit *superheater* terdiri dari dua bagian, yaitu *primary superheater* dan *secondary superheater*, dimana diantara *primary* dan *secondary superheater* terdapat fasilitas injeksi *desuperheater water* yang berfungsi untuk mengatur temperatur steam yang keluar *boiler* agar sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan.

2.6 Keseimbangan Massa dan Energi

Dalam sebuah sistem produksi listrik dalam PLTU, menghitung nilai keseimbangan massa dan energi merupakan hal yang penting. Keseimbangan massa berfungsi untuk mengontrol proses yang terjadi, terutama dalam mengontrol jumlah produk dan bahan baku. Jumlah massa yang masuk harus bernilai sama dengan jumlah massa yang keluar ^[4].

$$\sum mR = \sum mP + \sum mW + \sum mS \quad (2.1)$$

Dimana,

$\sum mR$ = Total Massa Bahan Baku

$\sum mP$ = Total Massa Produk

$\sum mW$ = Total Massa Limbah

$\sum mS$ = Total Massa Akumulasi

Begitupun dengan energi, jumlah energi yang masuk kedalam sistem harus bernilai sama dengan jumlah energi yang keluar [4].

$$\sum ER = \sum EP + \sum EW + \sum EL \quad (2.2)$$

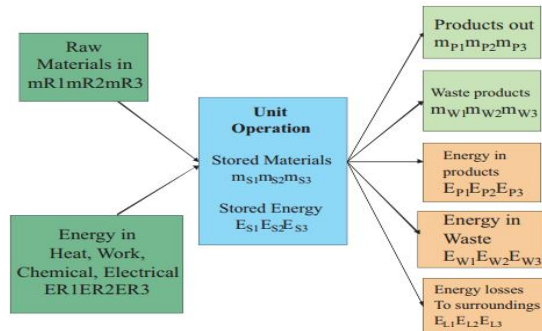
Dimana,

$\sum ER$ = Total Energi Masuk

$\sum EP$ = Total Energi Produk

$\sum EW$ = Total Energi Limbah

$\sum EL$ = Total Energi Hilang



Gambar 2.4 Kesetimbangan Massa dan Energi.^[13]

2.7 Efisiensi Boiler

Efisiensi termis boiler didefinisikan sebagai persentase energi panas bahan bakar (*heat input*) yang digunakan secara efektif pada steam yang dihasilkan atau dengan pengertian efisiensi yang lain, efisiensi pada boiler adalah prestasi kerja atau tingkat unjuk kerja boiler yang didapatkan dari perbandingan antara energi yang dipindahkan ke fluida kerja atau diserap oleh fluida kerja didalam boiler dengan masukan energi panas bahan bakar.

Berdasarkan USA Standard ASME PTC 4-1 *Power Test Code for Steam Generating Units* terdapat dua metode dalam mengevaluasi efisiensi boiler yaitu dengan menggunakan metode langsung dimana energi dipindahkan ke fluida kerja (air dan uap) dibandingkan dengan energi bahan bakar panas bahan bakar boiler. Kedua adalah dengan metode tidak langsung dimana efisiensi merupakan perbedaan antara persentase panas yang masuk dan persentase kehilangan-kehilangan yang terjadi.

2.7.1 Metode Langsung (Direct Method)

Dikenal dengan metode input-output karena metode ini hanya memerlukan panas keluaran/output dan panas masuk/input untuk evaluasi efisiensi. Dimana output merupakan energi panas

yang dipindahkan ke fluida kerja untuk memproduksi uap pada kondisi keluaran superheater dan panas masuk/input merupakan energi panas bahan bakar.

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta) = \frac{\text{panas masuk}}{\text{panas keluar}} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\text{Efisiensi boiler } (\eta) = \frac{Qx(hg-hf)}{q \times GCV} \times 100\% \quad (2.4)$$

dimana :

hg = Entalpi *steam* jenuh dalam kkal/kg *steam*

hf = Entalpi air umpan dalam kkal/kg air

Parameter yang dipantau untuk perhitungan efisiensi *boiler* dengan metode langsung adalah:

- Jumlah *steam* yang dihasilkan per jam (Q) dalam kg/jam.
- Jumlah bahan bakar yang digunakan per jam (q) dalam kg/jam.
- Tekanan kerja (dalam kg/cm²(g)) dan suhu lewat panas (°C), jika ada
- Suhu air umpan (°C)
- Jenis bahan bakar dan nilai panas kotor bahan bakar (GCV) dalam kkal/kg bahan bakar.

Adapun keuntungan metode langsung yaitu:

- Pekerja pabrik dapat dengan cepat mengevaluasi efisiensi *boiler*.
- Memerlukan sedikit parameter untuk perhitungan
- Memerlukan sedikit instrumen untuk pemantauan
- Mudah membandingkan rasio penguapan dengan data *benchmark*

Kerugian metode langsung :

- Tidak memberikan petunjuk kepada operator tentang penyebab dari efisiensi sistem yang lebih rendah.

- Tidak menghitung berbagai kehilangan yang berpengaruh pada berbagai tingkat efisiensi

2.7.2 Metode Tidak Langsung

Metode *indirect* adalah metode yang menggunakan selisih antara besar energi *input* dan *losses*. Metode ini biasanya disebut metode *heat losses*. Dalam menggunakan metode *indirect*, data yang dibutuhkan berupa *coal fired boiler* dan *fuel analysis*.

Pada data *Coal fired boiler* terdapat jumlah bahan bakar yang masuk tiap jam, jumlah *steam* tiap jam, tekanan dan suhu *steam output*, suhu *feed water*, kandungan kadar CO₂ dan CO, suhu gas buang, suhu lingkungan, kelembapan udara lingkungan, suhu permukaan boiler, kecepatan angin disekitar boiler, total luas permukaan boiler, nilai GCV *bottom ash* dan *fly ash*.

Pada data *Fuel analysis* terdapat data kadar abu, karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, sulfur, dan nilai HHV dari batubara.

Pada standar ASME PTC 41, Ada 8 *heat losses* yang terdapat dalam boiler seperti pada :

- ***Heat loss due to dry flue gas (L₁)***

$$L_1 = \frac{m \cdot Cp \cdot (T_f - T_a)}{GCV} * 100 \quad (2.5)$$

Dimana,

m	= Massa dari gas buang kering	(kg/kg fuel)
Cp	= Kalor spesifik dari gas buang kering	(kCal/kg ⁰ C)
GCV	= Nilai kalor batubara	(kCal/kg)
Tf	= Temperature gas buang	(⁰ C)
Ta	= Temperature ambient	(⁰ C)

- ***Heat loss due to H₂ in fuel (L₂)***

$$L_2 = \frac{9 \cdot H_2 \cdot (584 + Cp(T_f - T_a))}{GCV} * 100 \quad (2.6)$$

Dimana,

H_2 = Jumlah atom hydrogen dalam bahan bakar (kg/kg fuel)

C_p = Kalor spesifik dari superheated steam (kCal/kg 0C)

584 = Panas latent yang berhubungan dengan tekanan parsial dari uap air (kCal/kg)

• ***Heat loss due to moisture in fuel (L_3)***

$$L_3 = \frac{M*(584+C_p(T_f-T_a))}{HHV} * 100 \quad (2.7)$$

(2.7)

Dimana,

M = Kelembapan dalam bahan bakar (kg/kg fuel)

• ***Heat loss due to moisture in air (L_4)***

$$L_4 = \frac{AAS*humidity\ factor*C_p(T_f-T_a)}{GCV} * 100 \quad (2.8)$$

Dimana,

AAS = Massa aktual udara (kg/kg fuel)

Humidity factor = 0,024

C_p = Kalor spesifik of air (kCal/kg 0C)

• ***Heat loss due to incomplete combustion (L_5)***

$$L_5 = \frac{\%CO*C*5654}{(\%CO+\%CO_2)*GCV} * 100 \quad (2.9)$$

Dimana,

CO = Volume CO dalam gas buang (%)

CO_2 = Volume aktual CO_2 dalam gas buang (%)

C = Kadar karbon (kg/kg fuel)

- **Heat loss due to radiation and convection (L_6)**

$$L_6 = 0,548 * \left[\left(\frac{T_s}{55,55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55,55} \right)^4 \right] + 1,957 * (T_s - T_a)^{1,25} * \sqrt{[(196,85 * V_m + 68,9)/68,9]} \quad (2.10)$$

Dimana,

V_m = Kecepatan angin (m/s)

T_s = Temperature permukaan (K)

T_a = Temperature ambient (K)

- **Heat loss due unburnt in fly ash (L_7)**

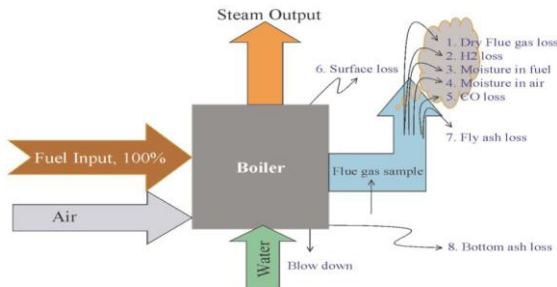
$$L_7 = \frac{\text{Total fly ash} * \text{GCV fly ash}}{\text{Total fuel burnt} * \text{GCV}} * 100 \quad (2.11)$$

- **Heat loss due unburnt in bottom ash (L_8)**

$$L_8 = \frac{\text{Total bottom ash} * \text{GCV bottom ash}}{\text{Total fuel burnt} * \text{GCV}} * 100 \quad (2.12)$$

Efisiensi boiler didapat dengan mengurangi 100 dengan seluruh *losses*

$$\eta_{\text{boiler}} = 100 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7 + L_8) \quad (2.13)$$



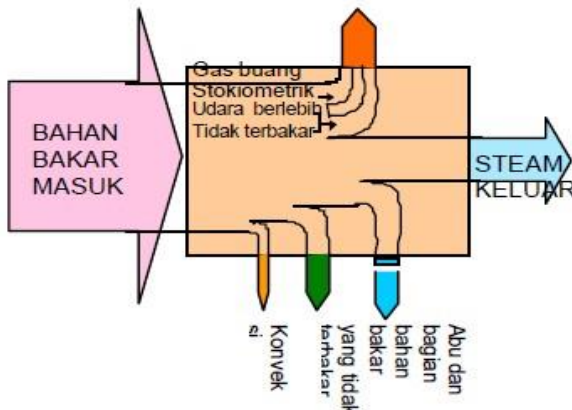
Gambar 2.5 Heat Loss pada Boiler^[10]

2.8 Diagram Sankey

Diagram sankey dapat membantu dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat atau tidak dapat dihindari. Proses pembakaran dalam boiler dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir energi. Diagram ini menggambarkan secara grafis tentang bagaimana energi masuk dari bahan bakar diubah menjadi aliran energi dengan berbagai kegunaan dan menjadi aliran kehilangan panas dan energi. Panah tebal menunjukkan jumlah energi yang dikandung dalam aliran masing-masing. (UNEP, 2008)

Diagram sankey merupakan keseimbangan energi total yang masuk *boiler* terhadap yang meninggalkan *boiler* dalam bentuk yang berbeda. **Gambar 2.6** berikut memberikan gambaran berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkitan *steam*.

Lebar panah sebanding dengan ukuran laju aktual sehingga dapat dianalisa energi yang dihasilkan mengalami keuntungan atau kerugian supaya manajer energi dapat fokus untuk mencari pengembangan dalam skala prioritas.



Gambar 2.6 Diagram Sankey^[13]

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

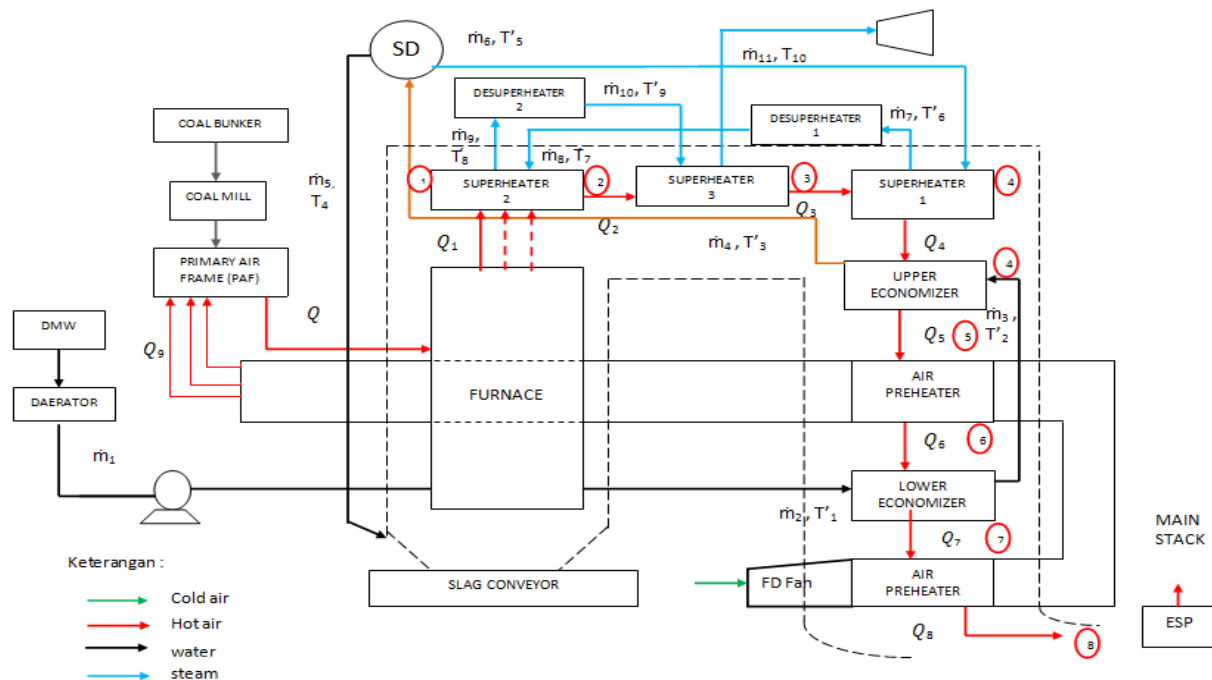
Adapun alur dalam melakukan penelitian tugas akhir ini sebagai berikut. Pertama melakukan studi literatur mengenai *plant* melalui gambar P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*) dan merumuskan masalah yang terjadi serta mencari sumber-sumber sebagai bahan studi literatur, baik dalam bentuk jurnal/*thesis* maupun *text-book*. Langkah kedua adalah pengumpulan data dimana data yang diambil yaitu berupa data *existingplant* pada saat beroperasi. Kemudian membuat blok diagram sistem berdasarkan PFD (*Process Flow Diagram*) untuk mengamati proses apa saja yang terjadi didalamnya. Kemudian membuat model matematis *plant* yang merepresentasikan proses yang terjadi didalam *plant* berdasarkan hukum kesetimbangan massa dan energi. Penurunan model matematis ini dilakukan untuk memperkuat penjelasan mengenai proses yang terjadi pada plant yaitu Boiler B 0201B sesuai dengan diagram blok proses yang terjadi dari data-data yang diperoleh. Data-data meliputi hasil produksi uap panas, konsumsi air umpan yang digunakan untuk produksi, berapa banyak bahan bakar yang digunakan, serta data lainnya meliputi tekanan dan temperatur uap panas, air umpan, maupun bahan bakar, pada setiap proses yang terjadi pada Boiler 520 B 401 Selanjutnya dilakukan identifikasi mengenai variabel proses apa saja yang terlibat didalam proses tersebut, dalam hal ini variabel proses yang terlibat adalah laju aliran bahan bakar serta temperatur *steam* dan tekanan *steam* pada boiler. Setelah itu, melakukan perhitungan efisiensi dengan metode *indirect/heat loss* dan kemudian menuju ke tahap selanjutnya yakni analisis data dan pembahasan terhadap perhitungan yang telah dilakukan. Kemudian diakhiri dengan penyusunan laporan tugas akhir.

3.2 Identifikasi Boiler

Identifikasi alat adalah kumpulan spesifikasi-spesifikasi data-data teknik tentang suatu alat produksi yang berfungsi sebagai pedoman agar proses produksi berjalan baik, efektif, dan efisien. Berikut ini merupakan spesifikasi alat yang digunakan sebagai objek penelitian.

Boiler UBB B 0201B

- Tipe : *WaterTube Boiler*
- Bahanbakar : Batubara
- *Economizer* : ada
- *Desuperheater* : ada
- Desain kapasitas : 150 ton/jam
- GCV batubara : 4100 kkal/kg
- Entalpi BFW (120 kg/cm², 250°C): 225,57 kkal/kg
- Entalpi steam (521°C, 90.3 bar): 821,15 kkal/kg
- *Mainsteam* temperature: 540⁰C
- *Manufacture/Vendor* : *Tangshan Xinde Boiler* (China)
- Tahun Pembuatan : 2010



Gambar 3.1 Proses Boiler

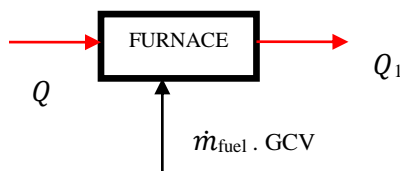
Dari diagram blok diatas, air di supply dari *demin water tank* yang dialirkan ke daerator, kemudian air dari daerator dipompa oleh BFW (Boiler Feed Water) menuju ke *low economizer* sebagai \dot{m}_2 . Di dalam economizer, pipa-pipa air dipanaskan oleh panas hasil pembakaran batu bara di furnace (Q_1) yang dimanfaatkan sebagai proses pemetukan uap panas di waterwall. Setelah itu diteruskan sebagai \dot{m}_3 menuju *upper economizer*, kemudian air akan masuk kedalam *steam drum* sebagai \dot{m}_4 untuk penyimpanan sementara, *steam drum* juga berfungsi memisahkan air dan *steam*. Di dalam steam drum dipisahkan menurut massa jenisnya, berupa *steam* dialirkan kedalam pipa *superheater* agar menjadi *dry steam* sebagai \dot{m}_6 . Proses uap lanjut sampai superheater 3 sehingga uap yang dihasilkan kering dan tidak mengandung air lagi. Dari *steam drum* steam menuju SH 1 sebagai \dot{m}_6 menuju DSH 1 sebagai \dot{m}_7 . Selanjutnya menuju SH 2 (\dot{m}_8) kemudian ke DSH 2 (\dot{m}_9). Lalu, menuju SH 3 sebagai \dot{m}_{10} dan dari SH 3 (\dot{m}_{11}). *Steam* ini akan disalurkan ke 3 bagian yaitu untuk plant II, plant III dan untuk memutar turbin, putaran turbin ini akan dikonversi menjadi tenaga listrik. Sedangkan air pada *steam drum* akan dibuang oleh blowdown (\dot{m}_5). Untuk proses pembakaran, batu bara yang sudah dihaluskan oleh coal mill berupa partikel kecil sesuai standar besaran partikel batu bara PT. Petrokimia dimasukkan ke dalam furnace dengan bantuan *primary air frame* (PAF) dengan disemprotkan yang dibantu oleh udara luar dan udara panas dari air preheater (Q) dan akan menghasilkan panas yang mengalir ke superheater 2 sebagai Q_1 dan panas yang melewati superheater 2 sebagai Q_2 menuju superheater 3. Selanjutnya panas yang melewati superheater 3 disebut sebagai Q_3 menuju superheater 1. Panas yang melewati superheater 1 sebagai Q_4 menuju upper economizer. Panas dari upper economizer sebagai Q_5 menuju air preheater (Q_6). Setelah itu, melewati low economizer sebagai Q_7 kemudian melewati air preheater kedua sebagai Q_8 . Lalu menuju ESP. Dalam air preheater terdapat FD Fan dimana berfungsi menyedot udara luar (cold air) agar menurunkan panas pada air

preheater kedua (secondary air heater) menuju ESP. Batu bara yang dibakar di dalam boiler akan menghasilkan udara panas yang bercampur dengan fly ash. Batubara dibakar didalam *boiler* dan dari hasil pembakaran tersebut akan menghasilkan udara panas yang bercampur dengan *fly ash* serta *bottom slag*. Panas ini akan melewati heat exchanger superheater, economizer dan air preheater. *Bottom slag* adalah sisa batubara yang tidak bisa ikut terbakar sempurna sehingga akan langsung di buang melewati *slag conveyor*.

3.3 Pemodelan Matematis

Dari data operasional yang diperoleh untuk Boiler B 0201B, maka dapat dilakukan penurunan model matematis untuk melakukan analisis termodinamika berdasarkan hukum kekekalan massa dan energi. Berikut ini adalah penurunan matematis pada tiap-tiap komponen boiler sesuai dengan hukum kekekalan massa dan energi.

3.3.1 Furnace



Gambar 3.2 Sistem pada Furnace

Hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada furnace adalah sebagai berikut

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{bahan bakar} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{dari furnace} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{kalor} \\ \text{dari PAF} \end{array} \right]$$

Dari persamaan hukum diatas, maka persamaan kesetimbangan energi pada furnace adalah sebagai berikut

$$Q_1 = \dot{m}_{\text{fuel}} \cdot \text{GCV} + Q \quad (3.1)$$

Dimana :

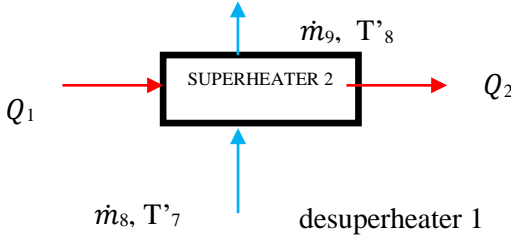
\dot{m}_{fuel} = Laju bahan bakar tetap sesuai dengan data teknis (kg/s).

GCV = Gross Calorific Value (kJ/kg).

Q_1 = Kalor Pembakaran yang dihasilkan *Burner* (kJ/s)

Q = Kalor dari air PAF (kJ/s)

3.3.2 Superheater 2



Gambar 3.3 Sistem pada Superheater 2

Hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada Superheater 2 adalah sebagai berikut

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju energi pada} \\ \text{superheater 2} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{dari DSH 1} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{ke Superheater 3} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{kalor pembakaran} \\ \text{dari furnace} \end{array} \right]$$

$$Q_2 = \dot{m}_8 \cdot C_{p1} \cdot T_7 - \dot{m}_9 \cdot C_{p2} \cdot T_8 + Q_1 \quad (3.2)$$

dimana

\dot{m}_8 = Laju aliran massa dari desuperheater 1 (kg/s)

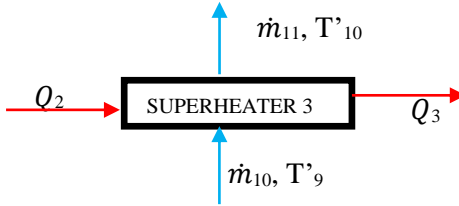
\dot{m}_9 = Laju aliran massa SH 2 (kg/s)

C_p = kalor spesifik pada superheater 2 (kJ/kg.°K)

T_7 = Temperature input superheater 2 (K)

T_8 = Temperatue output superheater 2 (K)

3.3.3 Superheater 3



Gambar 3.4 Sistem Pada Superheater 3

Hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada Superheater 3 adalah sebagai berikut

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju energi pada} \\ \text{superheater 3} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{dari DSH 2} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{ke Superheater 1} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{kalor pembakaran} \\ \text{dari furnace} \end{array} \right]$$

$$Q_3 = \dot{m}_{10} \cdot C_{p1} \cdot T'_9 - \dot{m}_{11} \cdot C_{p2} \cdot T'_{10} + Q_2 \quad (3.3)$$

dimana

\dot{m}_{10} = Laju aliran massa dari desuperheater 2 (kg/s)

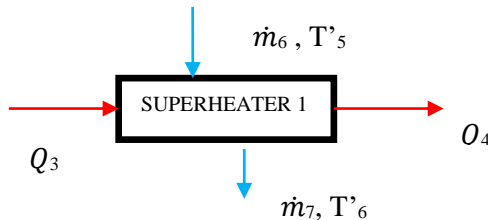
\dot{m}_{11} = Laju aliran massa steam akhir (kg/s)

C_p = kalor spesifik pada superheater 3 (kJ/kg.K)

T'_9 = Temperature input superheater 3 (K)

T'_{10} = Temperatur output superheater 3 (K)

3.3.4 Superheater 1



Gambar 3.5 Sistem Pada Superheater 1

Hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada Superheater 1 adalah sebagai berikut

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju energi pada} \\ \text{superheater 1} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{dari Steam} \\ \text{drum} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{ke upper} \\ \text{economizer} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{k calor pembakaran} \\ \text{dari furnace} \end{array} \right]$$

$$Q_4 = \dot{m}_6 \cdot C_{p1} \cdot T'_5 - \dot{m}_7 \cdot C_{p2} \cdot T'_6 + Q_3 \quad (3.4)$$

dimana

\dot{m}_6 = Laju aliran massa dari steam drum (kg/s)

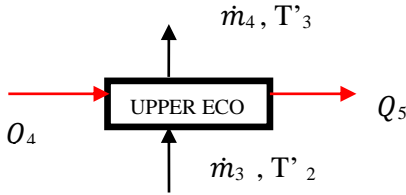
\dot{m}_7 = Laju aliran massa superheater 1 (kg/s)

C_p = kalor spesifik pada superheater 1 (kJ/kg.K)

T'_6 = Temperature output superheater 1 (K)

T'_5 = Temperature input superheater 1 (K)

3.3.5 Upper economizer



Gambar 3.6 Sistem Pada Upper Economizer

Hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada upper economizer adalah sebagai berikut

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju energi pada} \\ \text{upper} \\ \text{economizer} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{dari} \\ \text{superheater 1} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{ke lower} \\ \text{economizer} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{k calor pembakaran} \\ \text{dari furnace} \end{array} \right] \quad (3.5)$$

$$Q_5 = \dot{m}_3 \cdot C_{p1} \cdot T'_2 - \dot{m}_4 \cdot C_{p2} \cdot T'_3 + Q_6$$

dimana

\dot{m}_4 = Laju aliran massa upper economizer (kg/s)

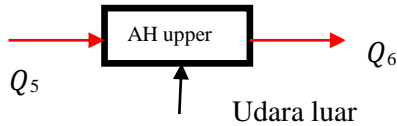
\dot{m}_3 = Laju aliran massa dari low economizer (kg/s)

C_p = kalor spesifik pada upper economizer (kJ/kg. K)

T'_3 = Temperature output upper economizer (K)

T'_2 = Temperature input upper economizer (K)

3.3.6 Upper Air Preheater



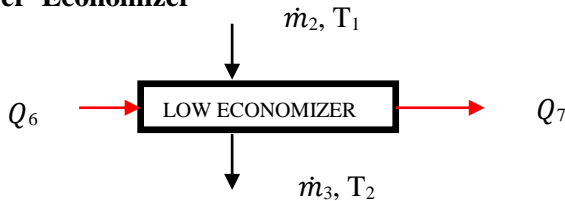
Gambar 3.7 Sistem Pada Upper Air Preheater

Hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada Superheater 2 adalah sebagai berikut

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju energi pada} \\ \text{Primary AH} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{dari upper} \\ \text{economizer} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{ke lower} \\ \text{economizer} \end{array} \right]$$

$$Q_6 = Q_5 + \dot{m}_{\text{hot}} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.6)$$

3.3.7 Lower Economizer



Gambar 3.8 Sistem Pada Lower Economizer

Hukum kesetimbangan energi yang terjadi pada Lower Economizer adalah sebagai berikut

$$\left[\begin{array}{c} \text{laju energi pada} \\ \text{lower} \\ \text{economizer} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{dari primary} \\ \text{AH} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{laju energi} \\ \text{ke Secondary} \\ \text{AH} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{k calor pembakaran} \\ \text{dari furnace} \end{array} \right]$$

$$Q_7 = \dot{m}_2 \cdot C_{p1} \cdot T_1 - \dot{m}_3 \cdot C_{p2} \cdot T_2 + Q_6 \quad (3.7)$$

dimana

\dot{m}_3 = Laju aliran massa dari low economizer (kg/s)

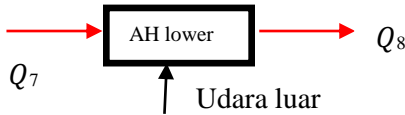
\dot{m}_2 = Laju aliran massa dari BFW (kg/s)

C_p = kalor spesifik pada superheater 3 (kJ/kg.K)

T_2 = Temperature output low economizer (K)

T_1 = Temperature input low economizer (K)

3.3.8 Low Air preheater



Gambar 3.9 Sistem Pada Lower Air Preheater

Hukum kesetimbangan massa yang terjadi pada *lower air preheater* adalah sebagai berikut

$$Q_8 = Q_7 - \dot{m}_{cool} \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (3.8)$$

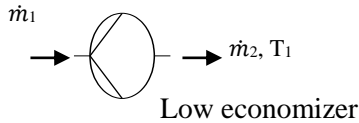
Dimana,

\dot{m}_{cool} = Laju aliran massa dari FD Fan (kg/s)

h_{out} = Entalpi temperature keluar (kJ/kg)

h_{in} = Entalpi temperature masuk (kJ/kg)

3.3.9 Feedwater pump



Gambar 3.10 Feedwater Pump

Hukum kesetimbangan massa yang terjadi pada feedwaterpump adalah sebagai berikut

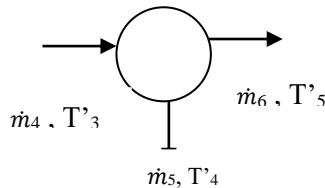
$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad (3.9)$$

dimana

$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ = Laju aliran massa dari BFW (kg/s)

T_1 = Temperature input low economizer (K)

3.3.10 Steam drum



Gambar 3.11 Sistem Pada Steam Drum

Hukum kesetimbangan massa yang terjadi pada steam drum adalah sebagai berikut

$$A\rho \frac{dh}{dt} = \dot{m}_4 - \dot{m}_5 - \dot{m}_6 \quad (3.10)$$

dimana

\dot{m}_4 = Laju aliran massa dari *upper economizer* (kg/s)

\dot{m}_5 = Laju aliran massa ke downcomer (kg/s)

- \dot{m}_6 = Laju aliran massa ke *superheater 1* (kg/s)
 A = Luas permukaan *steam drum* (m²)
 ρ = Densitas uap (kg/m³)
 h = *Level* ketinggian fluida pada *steam drum* (m)

$$efisiensi = \frac{Q_{furnace} - Q_{stack}}{Q_{stack}} \times 100\% \quad (3.11)$$

3.4 Perhitungan Indirect

Tabel 3.1 Data Coal Fired Boiler

1.	<i>Fuel firing rate</i>	<i>kg/hr</i>
2.	<i>Steam generation rate</i>	<i>kg/hr</i>
3.	<i>Steam pressure</i>	<i>Mpa</i>
4.	<i>Steam temperature</i>	<i>°C</i>
5.	<i>Feed water temperature</i>	<i>°C</i>
6.	<i>%CO₂ in flue gas</i>	<i>%</i>
7.	<i>%CO in flue gas</i>	<i>%</i>
8.	<i>%O₂ in flue gas</i>	<i>%</i>
9.	<i>Average flue gas temperature</i>	<i>°C</i>
10.	<i>Ambient temperature</i>	<i>°C</i>
11.	<i>Humidity in ambient air</i>	<i>kg / kg dry air</i>
12.	<i>Surface temperature of boiler</i>	<i>°C</i>
13.	<i>Wind velocity around the boiler</i>	<i>m/s</i>
14.	<i>Total surface area of boiler</i>	<i>m²</i>
15.	<i>GCV of Bottom ash</i>	<i>kCal/kg</i>
16.	<i>Ratio of bottom ash to fly ash</i>	<i>kCal/kg</i>
<i>Fuel Analysis in (%)</i>		
1.	<i>Ash content in fuel</i>	
2.	<i>Moisture in coal</i>	
3.	<i>Carbon content</i>	
4.	<i>Hydrogen content</i>	
5.	<i>Nitrogen content</i>	
6.	<i>Oxygen content</i>	
7.	<i>GCV</i>	<i>kCal/kg</i>

Pada fuel analysis terdiri dari data kadar abu, karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, sulfur, dan nilai GCV dari batu bara.

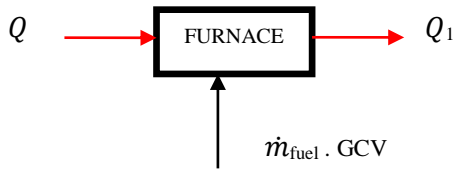
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Tiap-tiap komponen Boiler

4.1.1 Pemodelan matematis

1. Furnace



Gambar 4.1 Furnace

Berdasarkan data teknis di lapangan maka diperoleh model matematik dari persamaan (3.1) sebagai berikut :

$$Q_1 = GCV * Massa\ BB + Q$$

GCV= 4100 kcal/kg= 17.146,2 kJ/kg

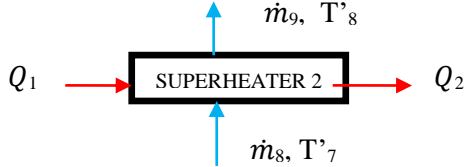
Sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} Q_1 &= 17.146,2 \frac{kJ}{kg} * 4,72 \frac{kg}{s} + 1,54 \frac{kJ}{s} \\ &= 80930,064 + 1,54 = 80.931,604 \\ &= 80,931 \times 10^3 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

$Q =, \dot{m}_{cool\ air} \cdot C_p \cdot T$

$$= 0,0066 \cdot 4,184 \cdot 56 = 1,54 \text{ kJ/s}$$

2. Superheater 2

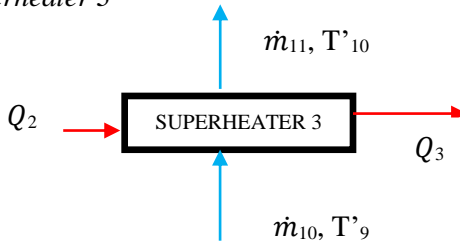


Gambar 4.2 Superheater 2

Berdasarkan data teknis di lapangan maka diperoleh model matematik dari persamaan (3.2) pada *superheater 2* sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= \dot{m}_8 \cdot C_{p1} \cdot T_7 - \dot{m}_9 \cdot C_{p2} \cdot T_8 + Q_1 \\
 &= 12,25 \cdot 4,187 \cdot 327 - 12,25 \cdot 4,325 \cdot 428 + 80.931,604 \\
 &= 72.027,704 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

3. Superheater 3

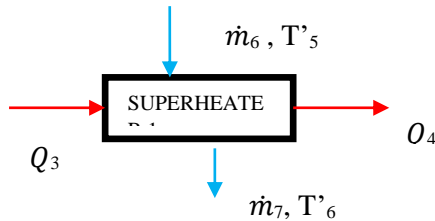


Gambar 4.3 Superheater 3

Berdasarkan data teknis di lapangan maka diperoleh model matematik dari persamaan (3.3) pada *superheater 3* sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Q_3 &= \dot{m}_{10} \cdot C_{P1} \cdot T'_9 - \dot{m}_{11} \cdot C_{P2} \cdot T'_{10} + Q_2 \\
 &= 12,34 \cdot 4,135 \cdot 298 - 19,17 \cdot 4,84 \cdot 510 + 75.027,704 \\
 &= 42.914,1942 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

4. Superheater 1

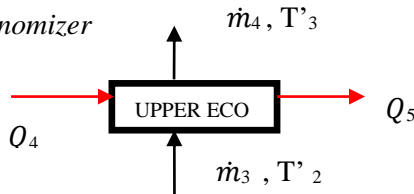


Gambar 4.4 Superheater 1

Berdasarkan data teknis di lapangan maka diperoleh model matematik dari persamaan (3.4) pada *superheater 1* sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Q_4 &= \dot{m}_6 \cdot C_{P1} \cdot T'_5 - \dot{m}_7 \cdot C_{P2} \cdot T'_6 + Q_3 \\
 &= 11,86 \cdot 4,135 \cdot 298 - 11,86 \cdot 4,3107 \cdot 423 + 42.914,1942 \\
 &= 35.902,608 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

5. Upper Economizer

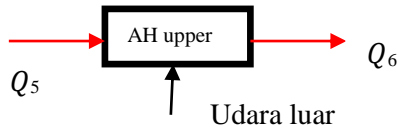


Gambar 4.5 Upper Economizer

Berdasarkan data teknis di lapangan maka diperoleh model matematik dari persamaan (3.5) pada *upper economizer* sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Q_5 &= \dot{m}_3 \cdot C_{p1} \cdot T'_2 - \dot{m}_4 \cdot C_{p2} \cdot T'_3 + Q_6 \\
 &= 14,44 \cdot 4,178 \cdot 391 - 9,76 \cdot 5,128 \cdot 543 + 35.902,608 \\
 &= 32.315 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

6. Upper Air Preheater

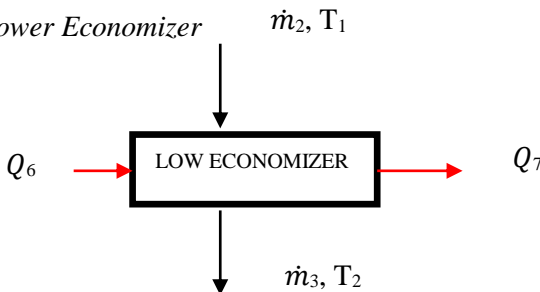


Gambar 4.6 Upper Air Preheater

Berdasarkan data teknis di lapangan maka diperoleh model matematik dari persamaan (3.6) pada *upper air preheater* sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Q_6 &= Q_5 + \dot{m}_{\text{hot}} \cdot C_p \cdot \Delta T \\
 &= 32.315 + 0,014 \cdot 4,18 \cdot 316 \\
 &= 32333,5 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

7. Lower Economizer

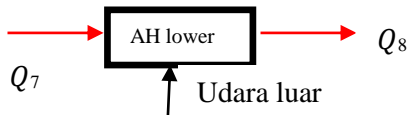


Gambar 4.7 Lower Economizer

Berdasarkan data teknis di lapangan maka diperoleh model matematik dari persamaan (3.7) pada *lower economizer* sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q_7 &= \dot{m}_2 \cdot C_{p1} \cdot T_1 - \dot{m}_3 \cdot C_{p2} \cdot T_2 + Q_6 \\ &= 18,33 \cdot 4,1805 \cdot 313 - 14,44 \cdot 4,1798 \cdot 397 + 32296,5 \\ &= 32.356,78 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

8. Lower Air Preheater

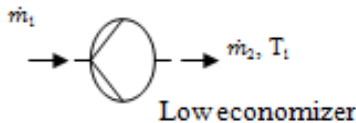


Gambar 4.8 Lower Air Preheater

Berdasarkan data teknis di lapangan, maka diperoleh persamaan (3.10) pada AH Lower sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q_8 &= Q_7 + \dot{m}_{\text{cool}} \cdot (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \\ &= 32.356,78 + 0,014 \cdot (514,351 - 452,83) \\ &= 32.356,86 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

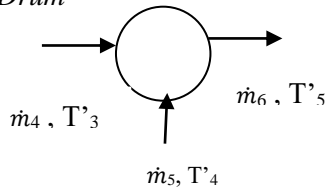
9. Feedwater Pump



Gambar 4.9 Feedwater Pump

Sehingga sesuai data teknis diperoleh, $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = 18,33$
Yang terlampir pada **Lampiran A**

10. Steam Drum



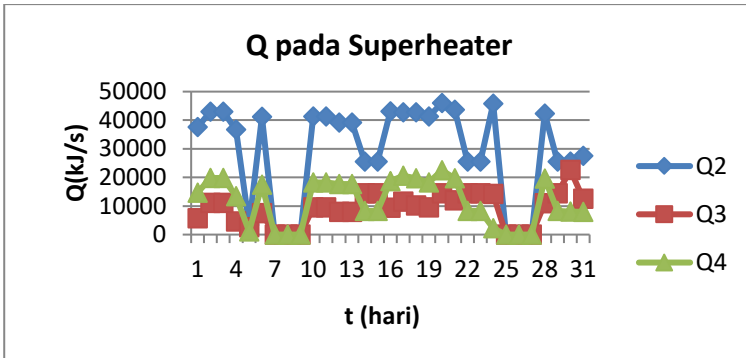
Gambar 4.10 Steam Drum

Data terlampir di **Lampiran A**

Data perhitungan diatas diambil pada tanggal 1 Juli 2016 tiap jam dalam satu hari, sehingga diperoleh rata-rata kalor (Q) pada tanggal 1 dengan kalor yang diserap terbesar pada furnace dan terkecil pada lower air preheater. Dari penggunaan kalor pada tiap-tiap komponen dapat diketahui sisa kalor yang akan dibuang ke main stack sebesar 32356,86 kJ/s dimana kalor yang dihasilkan furnace sebesar 80931 kJ/s, sehingga efisiensi dari boiler :

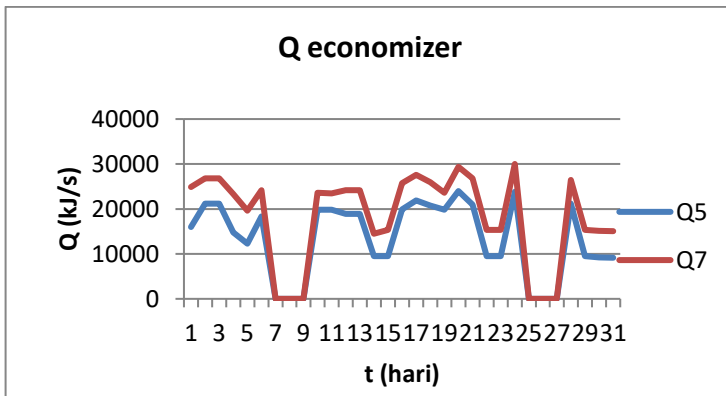
$$efisiensi = \frac{80931 - 32356,86}{80931} \times 100\% = 60,19\%$$

Hasil kalor (Q) pada tiap-tiap komponen akan dipresentasikan melalui grafik dibawah ini.



Gambar 4.11 Grafik Q pada Superheater

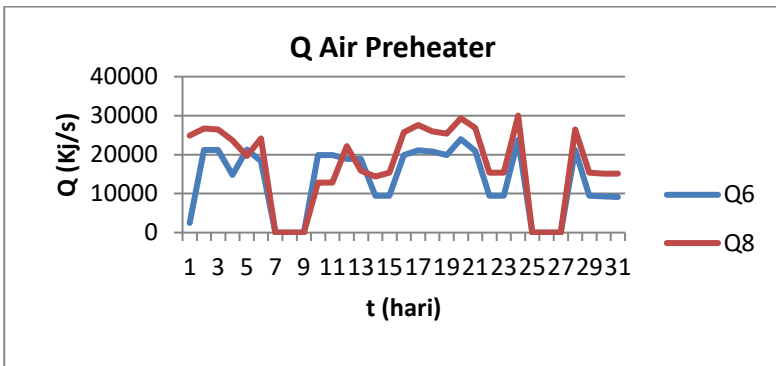
Dari grafik diatas menunjukkan kalor pada ketiga superheater. Q2 sebagai kalor yang diserap pada superheater 2, Q3 sebagai kalor yang diserap superheater 3 dan Q4 sebagai kalor yang diserap superheater 1. Dari perhitungan data nilai kalor Q2 adalah paling tinggi karena kalor yang didapat langsung dari furnace. Sedangkan Q3 memiliki nilai kalor yang rendah.



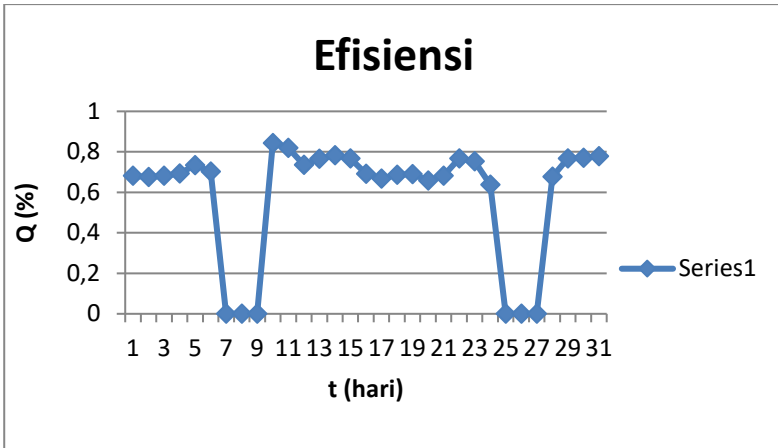
Gambar 4.12 Grafik Q pada Economizer

Pada boiler PT.Petrokimia terdapat dua economizer yaitu upper economizer dan Lower Economizer. Kalor yang diserap oleh Upper economizer sebagai Q5 dan kalor Q7 sebagai kalor yang diserap lower economizer. Grafik diatas menunjukkan kalor pada economizer. Terlihat bahwa kalor Q5 nilainya lebih tinggi daripada Q7.

Kalor yang diserap oleh air preheater pertama disebut sebagai Q6 dan yang diserap oleh air preheater kedua disebut Q8. Dari hasil data dan perhitungan Q8 menyerap kalor paling rendah.



Gambar 4.13 Grafik Q pada Air Preheater



Gambar 4.14 Efisiensi Rata-rata

Grafik diatas menunjukkan efisiensi boiler rata-rata tiap hari dalam sebulan, pada tiap-tiap komponen boiler berdasarkan kesetimbangan massa dan energi. Kalor yang digunakan untuk pemanasan pada proses berasal dari pembakaran pada furnace. Besar kalor yang dihasilkan tergantung dari nilai \dot{m}_{fuel} dan temperatur pada Q. Efisiensi boiler itu sendiri diperoleh dari perhitungan nilai rata-rata efisiensi kalor perjam dalam satu hari, sedangkan kalor didapat dari perhitungan dari laju aliran massa fuel, steam dan feedwater. Sehingga diperoleh rata-rata efisiensi boiler dalam satu bulan sebesar 72,44%. Data kalor terlampir di **Lampiran B**. Sisa panas yang digunakan akan dibuang melalui main stack/cerobong sebesar Q_8 . Dari sisa kalor ini akan diketahui efisiensi penggunaan kalor pada boiler.

4.2 Analisa Kehilangan Panas

Perhitungan heat loss dengan *Indirect Method ASME PTC 4.1* bertujuan untuk mengetahui nilai *losses* yang terjadi pada boiler berdasarkan parameter yang ada pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Banyaknya parameter yang diperhitungkan akan membantu operator menemukan petunjuk apabila terjadi penurunan efisiensi boiler.

4.2.1 Data Perhitungan

Tabel 4.1 Data Coal Fired Boiler PT. Petrokimia Gresik

Data Coal Fired Boiler		
<i>Fuel Firing Rate</i>	17.000	kg/hr
<i>Steam Generation Rate</i>	69.000	kg/hr
<i>Steam Pressure</i>	84,637	kg/cm ² (g)
<i>Steam Temperature</i>	524	°C
<i>Feed Water Temperature</i>	40	°C
<i>%CO₂ in Flue Gas</i>	14,3	%
<i>%CO in Flue Gas</i>	0,5	%
<i>Flue Gas Temperature</i>	154	°C
<i>Ambient Temperature</i>	31	°C
<i>Humidity in Ambient Air</i>	0,24	kg/kg dry air
<i>Surface Temperature</i>	90	°C
<i>Wind Velocity</i>	3,5	m/s
<i>Total surface of boiler</i>	18,34	m ²
<i>HHV of Bottom Ash</i>	1.079,33	kCal/kg
<i>HHV of Fly Ash</i>	116,93	kCal/kg
<i>Ratio Bottom to Fly Ash</i>	221:31:40	

Tabel 4.2 Data *Fuel Analysis*

Data <i>Fuel Analysis</i>		
Ash	3,3	%
Moisture	18,73	%
Carbon	37,33	%
Hydrogen	4,26	%
Nitrogen	1,23	%
Oxygen	34,7	%
Sulphur	0,45	%
HHV	4.100,00	kCal/kg
Total	100	%

1. Perhitungan Laju Massa Udara dan Massa Flue Gas

a. Kondisi teori udara yang dibutuhkan untuk pembakaran

$$\begin{aligned}
 & \text{Theoretical air (t)} \\
 &= \frac{(11.6 \times C) + \{34.8 \times (H_2 - O_2/8)\} + (4.35 \times S)}{100} \\
 &= 7,65 \text{ kg/kg of coal}
 \end{aligned}$$

b. Kondisi teori CO₂ , (CO₂) t

$$(CO_2 \text{ t}) = \frac{\text{Moles C}}{\text{Moles of N}_2 + \text{Moles of C} + \text{Moles of S}}$$

Dimana,

$$\text{Moles of C} = \frac{\text{Wt of C in fuel}}{\text{mol Wt of C}}$$

$$\text{Moles of S} = \frac{\text{Wt of S in fuel}}{\text{mol Wt of S}}$$

Moles of N₂

$$= \frac{\text{Wt of N}_2 \text{ in theoritical air}}{\text{mol Wt of N}_2} + \frac{\text{Wt of N}_2 \text{ in fuel}}{\text{mol Wt of N}_2}$$

$$= \frac{7,65 \times 77/100}{28} + \frac{1,23/100}{28} = 0,211$$

$$\text{Moles of C} = \frac{58,63}{100 \times 12}$$

$$= 0,0488$$

$$\text{Moles of S} = \frac{0,27}{100 \times 32}$$

$$= 0,000084$$

$$(CO_2 \text{ t}) = \frac{0,0488}{0,211+0,0488+0} = 18,82 \%$$

- c. *Excess air supplied* (dari analisis flue gas)
Perhitungan

$$\text{Excess air supplied}$$

$$= \frac{7900 \times [(CO_2 \% t) - (CO_2 \% a)]}{(CO_2 \% a) \times [100 - (CO_2 \% t)]}$$

$$\text{Excess air supplied} = \frac{7900 \times [(18,82) - (14,3)]}{(14,3) \times [100 - (18,82)]}$$

$$= 29 \%$$

d. *Actual mass of air supplied (AAS)*

$$\begin{aligned} AAS &= (1 + EA/100) \times \text{theoretical air (t)} \\ &= (1 + 29/100) \times 7,65 \\ &= 9,87 \text{ kg/kg of coal} \end{aligned}$$

Sehingga massa laju udara,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{air}} &= AAS \times \dot{m}_{\text{fuel}} \\ &= 9,87 \text{ kg/kg of coal} \times 17.000 \text{ kg/hr} \\ &= 167831,07 \text{ kg/hr} = 46,6 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

e. *Actual mass of dry flue gas*

$$\begin{aligned} &= \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{NO}_2 \text{ in the fuel} + \text{NO}_2 \text{ in the AAS} + \text{O}_2 \text{ in} \\ &\quad \text{the flue gas} \\ &= \left(\frac{C}{100} \times \frac{44}{12} \right) + \left(\frac{N_2}{100} \right) + \left(AAS \times \frac{77}{100} \right) + (AAS - \\ &\quad \text{theoretical air} \times \frac{23}{100}) \\ &= 10,28 \text{ kg/kg of coal} \end{aligned}$$

Sehingga laju massa flue gas,

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{fg}} &= 10,28 \text{ kg/kg of coal} \times \dot{m}_{\text{fuel}} \\ &= 10,28 \text{ kg/kg of coal} \times 17.000 \text{ kg/hr} \\ &= 48,54 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

2. Perhitungan Heat Loss dengan Indirect Method

Berikut adalah perhitungan heat loss

a. *Heat loss due to dry flue gas (%)*

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{m \times Cp \times (T_f - T_a)}{GCV} \times 100 \\ &= \frac{10,28 \times 0,24 \times (152,76 - 31)}{4100} \times 100 \\ &= 7,4 \% \end{aligned}$$

- b. *Heat loss due to evaporation of water former due to H₂ in fuel (%)*

$$\begin{aligned} L_2 &= \frac{9x H_2 x (584 + Cp(T_f - T_a))}{GCV} x 100 \\ &= \frac{9 x 4,11 x 0,43 x (154 - 31)}{4100} x 100 \\ &= 5,75 \% \end{aligned}$$

- c. *Heat loss due to moisture in fuel (%)*

$$\begin{aligned} L_3 &= \frac{M x (584 + Cp(T_f - T_a))}{GCV} x 100 \\ &= \frac{18,73 x (584 x 0,43 x (154 - 31))}{4100} x 100 \\ &= 2,91 \% \end{aligned}$$

- d. *Heat loss due to moisture pressure in air (%)*

$$\begin{aligned} L_4 &= \frac{AAS x humidity factor x Cp(T_f - T_a)}{GCV} x 100 \\ &= \frac{9,87 x 0,24 x 0,43 (154 - 31)}{4100} x 100 \\ &= 3,06 \% \end{aligned}$$

- e. *Heat loss due to incomplete combustion (%)*

$$\begin{aligned} L_5 &= \frac{\%CO x C x 5744}{(\%CO + \%CO_2) x GCV} x 100 \\ &= \frac{0,5 x 0,5856 x 5744}{(0,5 + 14,3) x 4100} x 100 \\ &= 2,77 \% \end{aligned}$$

f. *Heat loss due to radiation and convection (%)*

$$L_6 = 0,548x \left[\left(\frac{T_s}{55,55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55,55} \right)^4 \right] + 1,957x (T_s - T_a)^{1,25} \\ \times \sqrt{[(196,85 * Vm + 68,9)/68,9]} \\ = 0,000$$

g. *Heat loss due unburnt in fly ash (%)*

$$L_7 = \frac{\text{Total fly ash collected/kg of fuel} \times \text{GCV fly ash}}{\text{GCV of fuel}} \times 100 \\ = \frac{0,1 \times 3,3/100 \times 116,933 \text{ kcal/kg}}{4100} \times 100 \\ = 0,09 \%$$

h. *Heat loss due to unburnt bottom ash (%)*

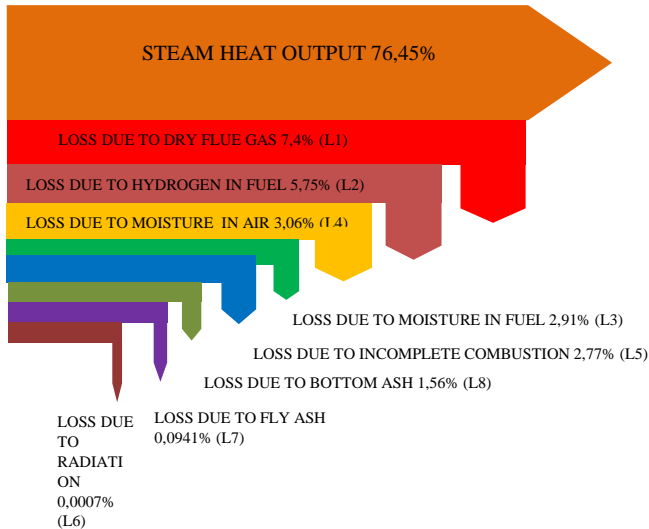
$$L_8 = \frac{\text{Total bottom ash collected/kg of fuel} \times \text{GCV bottom ash}}{\text{GCV of fuel}} \times 100 \\ L_8 = \frac{0,9 \times \frac{3,3}{100} \times 2.158,77 \text{ kcal/kg}}{4100 \text{ kcal/kg}} \times 100 \\ = 1,56\%$$

$$\text{Total Heat Loss} = L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8 \\ = 23,55$$

Tabel. 4.3 *Summary of Heat Balance for Coal Fired Boiler*

Summary of Heat Balance for Coal Fired Boiler			
Input/output Parameter		kCal/kg of coal	% loss
heat input		4100,00	100%
losses in boiler			
1. dry flue gas, L1		303,51	7,40%
2. Loss due to hydrogen in fuel, L2		235,59	5,75%
3. Loss due to moisture in fuel, L3		119,29	2,91%
4. Loss due to moisture in air, L4		125,32	3,06%
5. Partial combustion of C to CO, L5		113,77	2,77%
6. Surface heat losses, L6		0,03	0,0007%
7. Loss due to unburnt in fly ash, L7		3,86	0,0941%
8. Loss due to Unburnt bottom ash, L8		64,12	1,56%
Boiler Efficiency		76,45%	76,4518%

Berdasarkan **Tabel 4.3** rangkuman perhitungan dengan metode *Indirect* dipresentasikan dengan diagram sankey yang menunjukkan *heat balance* dari boiler pada **Gambar 4.15**.



Gambar 4.15 Diagram Sankey

Berdasarkan diagram sankey diatas, besar *heat loss* terbesar diakibatkan oleh *dry flue gas (L1)*. *Losses* ini terjadi karena pemanfaatan panas dalam ruang pembakaran kurang optimal serta pembakaran yang kurang sempurna. Didalam batubara mengandung atom hydrogen, dimana atom hydrogen dan oksigen ketika bereaksi akan menghasilkan air. Sehingga menyebabkan energi panas untuk memanaskan *steam* berkurang karena energi panas juga memanaskan air sehingga terjadi *losses hydrogen in fuel (L3)*

Pada *losses moisture in fuel*, *losses* ini terjadi karena batubara yang masuk ke boiler mempunyai kadar kelembapan rendah. Sehingga, diperlukan kadar kelembapan tinggi untuk meminimalkan *losses* dengan cara pemanasan batubara, tetapi

juga memperhatikan suhu maksimum batubara agar tidak terbakar pada saat proses pemanasan.

Losses unburnt carbon, ini terjadi karena pembakaran batubara tidak sempurna, sehingga menghasilkan abu. Abu ada yang berjenis *bottom ash* dan *fly ash*. *Bottom ash* yaitu abu yang mempunyai massa lebih besar daripada *fly ash*. Kadar abu yang ada dalam batubara berbeda-beda. Semakin sedikit kandungan abu maka efisiensi pembakaran tinggi, hal ini karena abu batubara sering menempel pada pipa-pipa boiler sehingga proses perpindahan panas dari *furnace* ke pipa terhambat oleh abu. Pembakaran atom C yang tidak sempurna, menyebabkan *losses* juga besar, hal ini karena perbandingan udara yang masuk ke boiler tidak sesuai dengan jumlah bahan bakar yang masuk sehingga menimbulkan terjadinya gas karbon monoksida (CO). Semakin besar kadar karbon monoksida maka *losses* yang dihasilkan semakin besar.

Adanya faktor kehilangan-kehilangan panas yang terjadi merupakan penyebab terjadinya penurunan, karena bahan bakar tidak seluruhnya diserap untuk pembentukan uap dan pemanasan, namun sebagian terbangun sebagai kehilangan-kehilangan panas/*heat loss*. Boiler harus dioperasikan dengan jumlah udara yang lebih dari kebutuhan udara teoritis guna menjamin pembakaran sempurna. Besarnya udara lebih harus tepat karena sebenarnya udara lebih itu akan membawa sejumlah panas keluar cerobong. Tingkat optimal udara lebih untuk efisiensi maksimal terjadi apabila jumlah kehilangan yang diakibatkan pembakaran tidak sempurna dan kehilangan yang disebabkan oleh panas dalam gas buang.

4.3 Analisa Efisiensi

Pada Tabel 4.3 berikut adalah tabel perbandingan nilai efisiensi boiler berdasarkan hasil perhitungan *direct method* dan *indirect method* ASME PTC 4.1

Tabel 4.4 Nilai Efisiensi

<i>Metode</i>	Efisiensi boiler (%)
<i>Direct Method</i>	72,44
<i>Indirect Method</i>	76,45

Berdasarkan **Tabel 4.4** terlihat bahwa hasil perhitungan efisiensi boiler dengan metode *Direct* yaitu menggunakan kesetimbangan massa dan energi lebih kecil dengan nilai 72,44% dan perhitungan dengan perhitungan metode *Indirect* nilainya lebih besar yaitu 76,45%. Hasil perhitungan kedua metode selisihnya tidak terlalu signifikan. Tetapi hasil ini berbeda dengan efisiensi desain dan aktual saat komisioning (data terlampir di **Lampiran C**), hal ini dikarenakan penyerapan kalor di tiap-tiap komponen heat exchanger. Dari perhitungan diatas, didapat adanya penurunan efisiensi boiler, hal ini ditandai dengan kelebihan panas pada gas buang. Semakin tinggi gas buang berarti semakin tinggi panas yang dihasilkan boiler. Hal ini berarti terjadi pemborosan panas yang berdampak pada penurunan efisiensi dari boiler tersebut. Penyebab naiknya temperatur gas buang boiler diantaranya kurangnya permukaan perpindahan panas dan fouling yang terjadi pada tubing-tubing perpindahan panas yang disebabkan oleh kerak, baik yang berasal dari bahan bakar maupun feed water. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya bahwa pengaruh dari terbentuknya *slagging* dan juga *fouling* berpengaruh pada efisiensi boiler..^[16]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Analisa data serta pembahasan mengenai pemodelan dinamik boiler menggunakan kesetimbangan massa dan energi di pabrik III PT.Petrokimia telah dilakukan pada BAB sebelumnya, sehingga dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagaiberikut:

1. Hasil dari pemodelan boiler tiap-tiap komponen menggunakan kesetimbangan massa dan energi diperoleh efisiensi rata-rata tiap hari selama satu bulan sebesar 72,44%. Dengan nilai kalor terbesar pada furnace dan nilai kalor terkecil pada lower air preheater.
2. Efisiensi boiler berdasarkan perhitungan menggunakan perhitungan *Indirect* method/heat loss sebesar 76,45% dengan kerugian panas terbesar terjadi pada gas buang dengan nilai 7,45%.
3. Hasil perhitungan nilai efisiensi boiler dengan menggunakan metode kesetimbangan massa dan energi lebih kecil dibandingkan dengan metode *Indirect*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Daftar Pustaka

- [1] Incropera, F. P. (1996). *Fundamental of Heat and Mass Transfer, 4th Edition*. Canada: John Willey and Sons Inc.
- [2] Chengel, Y.A. (1997). *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill
- [3] Djokostyardjo, M. J. (1999). *Ketel Uap*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- [4] Moran, M.J. & Shapiro, H.N. (2006). *Fundamental of Engineering Thermodynamics*. Chichester: Wiley
- [5] PETROKIMIA. (2010). *Operating Manual General : BOILER*. Gresik: PETROKIMIA GRESIK.
- [6] American Society of Mechanical Engineer. (1999). *Fired Steam Generation*. Australia : University of Science and Technology Liaoning, China and The University of Western Australia.
- [7] Kumar. (2009). *Boilers for Power and Process*. USA: Taylor & Francis Group.
- [8] Sadik Kakac. (1991). *Boilers, Evaporators and Condenser*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] J. B. Kitto and S. Stultz, (2006). *Steam its generation and use, 41st ed*. Ohio: The Babcock & Wilcox Company.
- [10] Moni Kuntal Bora and S. Nakkeeran. (2000). *Performance Analysis From The Efficiency Estimation of Coal Fired Boiler*. Chennai : Bharath University.

- [11] Untoro. (2016). *Upaya Peningkatan Efisiensi Kerja Boiler 520 B 401 di PT. Pertamina RU IV Cilacap Dengan Menggunakan Soot Blower*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [12] Nur Laila Hamidah. (2010). *Analisa Kinerja Waste Heat Boiler (WHB) dengan Metode Kesenjangan Panas dan Massa di Pabrik I (satu) PT. Petrokimia Gresik*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [13] Rendra Alfian Raharjo. (2014). *Analisis Unjuk Kerja Boiler (Gas Firing) pada PLTU Unit 3 PT. PJB UP Gresik*. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [14] Brundaban Patro. (2016). *Efficiency Studies of Combination Tube Boilers*. India: National Institute of Technology Rourkela, Odisha 769008.
- [15] Jorge Barroso, Felix Barreras, Hippolyte Amaveda, Antonio Lozano. (2003). *Optimization of Boiler Efficiency using Bagasse as Fuel*. Elsevier Publication, page 1451-1463.
- [16] Windha Ayu Prameswari. (2017). *Analisa pembentukan Slaging dan Fouling Pembakaran Batubara Pada Boiler B0201B Pabrik III Unit UBB di PT.Petrokimia Gresik*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN A

Data laju aliran massa

date	time	\dot{m} (kg/s)														
		\dot{m}_{fuel}		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$		\dot{m}_3	\dot{m}_4	\dot{m}_5		\dot{m}_6	\dot{m}_7	\dot{m}_8	\dot{m}_9	\dot{m}_{10}	\dot{m}_{11}	
01/07/2016	0:00:00	17,7	4,917	66	18,333	10,377	8,404	1,401	0,389	8,015	0,472	0,472	0,417	0,417	70	19,444
01/07/2016	1:00:00	17,7	4,917	66	18,333	10,377	8,404	1,401	0,389	8,015	0,472	0,472	0,417	0,417	70	19,444
01/07/2016	2:00:00	17,5	4,861	68	18,889	10,816	8,72	1,401	0,389	8,309	0,472	0,472	0,417	0,417	74	20,556
01/07/2016	3:00:00	17,5	4,861	68	18,889	10,816	8,72	1,401	0,389	8,309	0,472	0,472	0,417	0,417	74	20,556
01/07/2016	4:00:00	17,1	4,75	70	19,444	11,244	9,303	1,381	0,384	8,892	0,472	0,472	0,444	0,444	74	20,556
01/07/2016	5:00:00	17,1	4,75	70	19,444	11,244	9,303	1,381	0,384	8,892	0,472	0,472	0,444	0,444	74	20,556
01/07/2016	6:00:00	17,4	4,833	67	18,611	10,597	8,579	1,441	0,4	8,195	0,472	0,472	0,417	0,417	69	19,167
01/07/2016	7:00:00	17,4	4,833	67	18,611	10,597	8,579	1,441	0,4	8,195	0,472	0,472	0,417	0,417	69	19,167
01/07/2016	8:00:00	17,4	4,833	67	18,611	11,008	8,968	1,401	0,389	8,567	0,472	0,472	0,361	0,361	72	20
01/07/2016	9:00:00	17,4	4,833	67	18,611	11,008	8,968	1,401	0,389	8,567	0,472	0,472	0,361	0,361	72	20
01/07/2016	10:00:00	18	5	65	18,056	9,8734	7,756	1,401	0,389	7,366	0,472	0,472	0,361	0,361	70	19,444
01/07/2016	11:00:00	18	5	65	18,056	9,8734	7,756	1,401	0,389	7,366	0,472	0,472	0,361	0,361	70	19,444
01/07/2016	12:00:00	18	5	63	17,5	9,8158	7,816	1,401	0,389	7,426	0,472	0,472	0,361	0,361	70	19,444
01/07/2016	13:00:00	18	5	63	17,5	9,8158	7,816	1,401	0,389	7,426	0,472	0,472	0,361	0,361	70	19,444
01/07/2016	14:00:00	17,7	4,917	62	17,222	9,26	7,44	1,381	0,384	7,05	0,472	0,472	0,361	0,361	70	19,444
01/07/2016	15:00:00	17,7	4,917	62	17,222	9,26	7,44	1,381	0,384	7,05	0,472	0,472	0,361	0,361	70	19,444
01/07/2016	16:00:00	17,7	4,917	61	16,944	9,2573	7,212	1,381	0,384	6,828	0,472	0,472	0,361	0,361	69	19,167
01/07/2016	17:00:00	17,7	4,917	61	16,944	9,2573	7,212	1,381	0,384	6,828	0,472	0,472	0,361	0,361	69	19,167

01/07/2016	18:00:00	17,2	4,778	65	18,056	10,493	8,317	1,401	0,389	7,933	0,472	0,472	0,361	0,361	69	19,167
01/07/2016	19:00:00	17,2	4,778	65	18,056	10,493	8,317	1,401	0,389	7,933	0,472	0,472	0,361	0,361	69	19,167
01/07/2016	20:00:00	17,2	4,778	65	18,056	10,307	8,129	1,401	0,389	7,74	0,472	0,472	0,361	0,361	70	19,444
01/07/2016	21:00:00	17,2	4,778	65	18,056	10,307	8,129	1,401	0,389	7,74	0,472	0,472	0,361	0,361	70	19,444
01/07/2016	22:00:00	16,8	4,667	69	19,167	11,196	8,967	1,38	0,383	8,584	0,472	0,472	0,361	0,361	69	19,167
01/07/2016	23:00:00	16,8	4,667	69	19,167	11,196	8,967	1,38	0,383	8,584	0,472	0,472	0,361	0,361	69	19,167

LAMPIRAN B**DATA KALOR TIAP-TIAP KOMPONEN**

Tanggal	Q (kJ/s)							
	q1	q2	q3	q4	q5	q6	q7	q8
01/07/2016	78020	37634,7	5702,892	14627,4	15958,2	2447,9	24858,4	24858,4
02/07/2016	82235,3	42993,2	11041,06	19820,3	21174,6	21173,9	26774,3	26687,7
03/07/2016	83235,3	42993,2	11041,06	19820,3	21174,6	21173,9	26774,3	26477,7
04/07/2016	77162,7	36677,4	4542,011	13466,1	147995	14797,3	23287	23632,5
05/07/2016	73733,75	3348,1	2521,66	1145,81	12276,1	21266,7	19645,5	19653
06/07/2016	81449,3	41156,5	7523,786	17485,8	18312,3	18341,4	24174,2	24178,7
07/07/2016	0	0	0	0	0	0	0	0
08/07/2016	0	0	0	0	0	0	0	0
09/07/2016	0	0	0	0	0	0	0	0
10/07/2016	81925,5	41244,2	9515,671	18211,9	19854,8	19853,9	23577,8	12785
11/07/2016	71025,5	41244,2	9515,671	18211,9	19854,8	19853,9	23477,8	12785
12/07/2016	84020,4	39143,8	7875,862	17628,8	18890,4	18889,5	24193,4	22197,8
13/07/2016	68020,4	39143,8	7875,862	17628,8	18890,4	18889,5	24193,4	15897
14/07/2016	66208,2	25492,9	14403,96	8272,03	9478,53	9477,65	14478	14382

15/07/2016	66208,2	25492,9	14403,96	8272,03	9478,53	9477,65	15375	15382
16/07/2016	83354,4	43021	9355,026	18637,8	19903,8	19902,9	25730,3	25734,7
17/07/2016	82878,1	42787,1	11527,55	20598,4	21897,1	21096,3	27584	27588,4
18/07/2016	82878,1	42776,8	10211,95	19709,8	20786,2	20785,3	25940	25944,4
19/07/2016	81925,5	41244,2	9515,671	18211,9	19854,8	19853,9	23577,8	25382,2
20/07/2016	85735,8	46039	14403,96	22482,2	23976,4	23975,5	29355,2	29359,6
21/07/2016	84307	43591,7	11915,52	19733,5	20940	20939,1	26836,9	26841,3
22/07/2016	66208,2	25492,9	14403,96	8272,03	9478,53	9477,65	15375	15382
23/07/2016	62208,2	25492,9	14403,96	8272,03	9478,53	9477,65	15375	15382
24/07/2016	82735,8	45776,8	14144,34	2220,04	23812,2	23811,3	30004,5	30008,9
25/07/2016	0	0	0	0	0	0	0	0
26/07/2016	0	0	0	0	0	0	0	0
27/07/2016	0	0	0	0	0	0	0	0
28/07/2016	81925,5	42269,9	10988,36	19554,4	21180,6	21179,7	26474,8	26488,6
29/07/2016	66208,2	25492,9	14403,96	8272,03	9478,53	9477,65	15375	15382
30/07/2016	66208	25492,4	22635,04	8044,28	9250,79	9249,91	15147,7	15147,7
31/07/2016	68256,2	27541	12500,73	7942,94	9149,45	9148,57	15046,4	15147,7

LAMPIRAN C

Data Neraca Panas Komisioning

NERACA PANAS KEBB at Performance Test

Penyesuaian design

Entalpi Steam Produk (521°C, 90.3 bar)	:	1497	Btu/lb
		821,15	kcal/kg
Entalpi BFW (120 kg/cm ² , 250 C)	:	920,6	kJ/kg
		220,57	kcal/kg
Blowdown		5167,2	kg/h
Enthalpy BD (308 oC)		333,19	kcal/kg
Steam Produk	:	258360	kg/h
Rate Boiler	:	86,12%	
Kalor yang diserap Steam di Steam Drum	:	155.746.725	Kcal
Efisiensi Boiler	:	91	%
Kalor dari Pembakaran Batubara	:	171.150.247	Kcal
GCV Batubara	:	3726	kcal/kg
Konsumsi Batubara	:	45.934	Kg
	:	45,93	Ton
	:	22,967	ton/boiler
Consumption Rate Batubara	:	0,1778	ton/ton steam

Penyesuaian aktual			
Entalpi Steam Produk	:	1497	Btu/lb
(521°C, 90.3 bar)		821,15	kcal/kg
Entalpi BFW (120 kg/cm ² , 250 C)	:	920,6	kJ/kg
		220,57	kcal/kg
Blowdown		4777	kg/h
Enthalpy BD (308 oC)		333,19	kcal/kg
Steam Produk	:	238850	kg/h
Rate Boiler	:	79,62%	
Kalor yang diserap Steam di Steam Drum	:	143.985.544	kcal
Efisiensi Boiler	:	85,51	%
Kalor dari Pembakaran Batubara	:	168.384.451	kcal
GCV Batubara	:	4100	kcal/kg
Konsumsi Batubara	:	41.069	kg
	:	41,07	ton
	:	20,535	ton/boiler
Consumption Rate Batubara	:	0,1719	ton/ton steam

Data efisiensi Indirect Komisioning

Boiler <i>Losses</i>	Desain Operasional	Aktual
1. L ₁	5,07	7,4
2. L ₂	4,59	5,75
3. L ₃	2,95	2,91
4. L ₄	0,2	3,06
5. L ₅	2,1	2,77
6. L ₆	0,004	0,006
7. L ₇	0,06	0,094
8. L ₈	0,98	1,56
Efisiensi Boiler	84,05%	76,45%

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kutai, pada tanggal 19 Januari 1993. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 5 Panjer, SMPN 1 Kebumen, dan SMAN 2 Kebumen. Kemudian penulis melanjutkan studi di Program Studi D3 Metrologi dan Instrumentasi, Jurusan Teknik Fisika FTI-ITB Bandung pada tahun 2011. Selanjutnya penulis melanjutkan program S1 Lintas Jalur di Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS Surabaya Genap pada tahun 2014. Bidang minat yang diambil adalah rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan.

Dengan ketekunan dan semangat yang tinggi untuk terus belajar dan berusaha, penulis akhirnya berhasil menyelesaikan pengerjaan tugas akhir. Semoga dengan pengerjaan tugas akhir ini mampu memberikan kontribusi positif bagi dunia pendidikan serta pengembangan untuk penelitian selanjutnya.

Email : isantiatma@gmail.com

